

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ПОВОЛЖСКИЙ РЕГИОН
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**

№ 2 (58)

2021

СОДЕРЖАНИЕ

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

- Тычков А. Ю., Бутров Н. А., Алимуратов А. К., Назарычев А. П.**
Многоканальная система мониторинга основных показателей
здоровья человека 3
- Фомин Д. С., Бальзамов А. В.** Проблематика обработки транзакций
при использовании микросервисной архитектуры 15
- Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Агейкин А. В.,
Кузьмин А. В., Митрохин М. А., Чернов И. А.** Способ повышения
эффективности сегментации речь/пауза на основе метода
декомпозиции на эмпирические моды 24

**ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И РАДИОТЕХНИКА**

- Попов Д. И.** Анализ автокомпенсаторов доплеровского
сдвига фазы пассивных помех 44
- Алимова Е. А.** Особенности контроля металлокерамического спая
в вакуумных коммутирующих устройствах 53
- Воронина А. В., Павлов С. В.** Верификация математической модели
акустического тракта ультразвукового метода измерения расстояний
до нагретой вертикальной пластины в присутствии
естественной конвекции 63
- Абдирашев О. К.** Измерительная система линейных перемещений
на базе электромагнитного фазовращателя 77
- Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Полякова Е. А., Славкин И. Е.,
Кукушкин А. Н.** Реализация принципа двухканальности
в волоконно-оптических информационно-измерительных системах 87

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Козлов А. Ю., Сидоров А. И.** Вероятностно-временная модель
функционирования иерархической системы управления
разнородными территориально распределенными объектами 99
- Липов А. В., Нырклов Н. Н., Липов В. А.** Центробежно-ротационная
обработка сменных многогранных пластин режущего инструмента 113

**UNIVERSITY PROCEEDINGS
VOLGA REGION
ENGINEERING SCIENCES**

№ 2 (58)

2021

CONTENT

**COMPUTER SCIENCE, COMPUTER
ENGINEERING AND CONTROL**

<i>Tychkov A.Yu., Butrov N.A., Alimuradov A.K., Nazarychev A.P.</i> Multichannel system for monitoring the main indicators of human health.....	3
<i>Fomin D.S., Bal'zamov A.V.</i> The problem of transaction processing using microservice architecture	15
<i>Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Ageykin A.V., Kuz'min A.V., Mitrokhin M.A., Chernov I.A.</i> EMD-based method to improve the efficiency of speech/pause segmentation.....	24

**ELECTRONICS, MEASURING EQUIPMENT
AND RADIO ENGINEERING**

<i>Popov D.I.</i> Analysis of Doppler auto-compensators phase shift of passive interference	44
<i>Alimova E.A.</i> Control features of the metal-ceramic seal in vacuum switching devices	53
<i>Voronina A.V., Pavlov S.V.</i> Verification of the acoustic path mathematical model of the ultrasonic method for measuring distances to a heated vertical plate in conditions of natural convection	63
<i>Abdirashev O.K.</i> Linear displacement measuring system based on electromagnetic phase shifter.....	77
<i>Badeeva E.A., Murashkina T.I., Polyakova E.A., Slavkin I.E., Kukushkin A.N.</i> The implementation of the two-channel principle in fiber-optic information-measuring systems	87

MACHINE SCIENCE AND BUILDING

<i>Kozlov A.Yu., Sidorov A.I.</i> The robability-time model functioning of the hierarchical system management of heterogeneous territorial placed objects	99
<i>Lipov A.V., Nyrkov N.N., Lipov V.A.</i> A rotary centrifugal machining of replaceable multi-faceted cutting tool inserts.....	113

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 616-71

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-1

Многоканальная система мониторинга основных показателей здоровья человека

А. Ю. Тычков¹, Н. А. Бутров², А. К. Алимуратов³, А. П. Назарычев⁴

^{1,2,3,4}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹tychkov-a@mail.ru, ²butrov.nikita@yandex.ru, ³alansapfir@yandex.ru, ⁴rtech@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Мониторинг в режиме реального времени основных показателей здоровья человека, находящегося в условиях выполнения особо опасной профессиональной деятельности, является актуальной задачей государственной системы цифрового здравоохранения и, в частности, медицинского приборостроения. Создание многоканальных систем мониторинга позволит оперативно принимать решение о физиологическом, физическом и психоэмоциональном состоянии здоровья человека и обеспечивать прогноз на будущие периоды. *Материалы и методы.* Разрабатываемая система обеспечивает сбор, передачу, обработку и понятное отображение информации о критическом состоянии здоровья, а именно о пороговом уровне артериального давления и частоте сердечных сокращений, пройденном расстоянии (в случае спасательных работ), расходе калорий и уровне физической активности человека. *Результаты.* Представленная система заключается в параллельной регистрации физиологических сигналов от различных пользователей с помощью трекер-систем на многоканальное устройство приема/передачи посредством открытого стандарта беспроводной связи BLU 5.0. *Выводы.* В работе представлена многоканальная система мониторинга основных показателей состояния здоровья человека в период выполнения особо опасной профессиональной деятельности.

Ключевые слова: многоканальная система, особо опасные профессии, трекер-системы, беспроводная передача данных

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых и по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации МК-490.2020.8 «Разработка методологии исследования влияния психотравмирующих факторов на речевую функцию человека в условиях реальных экстремальных ситуаций».

Для цитирования: Тычков А. Ю., Бутров Н. А., Алимуратов А. К., Назарычев А. П. Многоканальная система мониторинга основных показателей здоровья человека // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 3–14. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-1

Multichannel system for monitoring the main indicators of human health

A.Yu. Tychkov¹, N.A. Butrov², A.K. Alimuradov³, A.P. Nazarychev⁴

^{1,2,3,4}Penza State University, Penza, Russia

¹tychkov-a@mail.ru, ²butrov.nikita@yandex.ru, ³alansapfir@yandex.ru, ⁴rtech@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* Monitoring the main indicators of human health in real time under conditions of performing especially dangerous professional activities is an urgent task of the digital health care system and medical instrumentation. Creating the multichannel monitoring systems will make it possible to quickly make a decision on the physiological, physical and psycho-emotional state of human health and provide a forecast for future periods. *Materials and methods.* The system being developed ensures the collection, transmission, processing and conceptual display of information about a critical state of health, namely, about the borderline level of blood pressure and heart rate, distance traveled (in the case of rescue operations), calorie expenditure and the level of physical activity of the person. *Results.* The presented system consists in the parallel registration of physiological signals from different users using tracker systems to a multichannel transmit / receive device using the BLU 5.0 open wireless communication standard. *Conclusions.* The article presents a multichannel system for monitoring the main indicators of the state of human health during the period of performing a particularly dangerous professional activity.

Keywords: multichannel system, especially dangerous professions, tracker systems, wireless data transmission

Acknowledgments: the research was financed by the Council for grants of the President of the Russian Federation for state support of young russian scientists and for state support of leading scientific schools of the Russian Federation MK-490.2020.08 “Development of a methodology for studying the influence of psychotraumatic factors on a person’s speech function in conditions of real extreme situations”.

For citation: Tychkov A.Yu., Butrov N.A., Alimuradov A.K., Nazarychev A.P. Multichannel system for monitoring the main indicators of human health. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;2:3–14. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-1

Введение

Особо опасная профессиональная деятельность любого специалиста предъявляет высокие требования к его физическому, физиологическому и психическому здоровью [1]. Профилактическая направленность государственной системы здравоохранения требует разработки, внедрения и совершенствования технологий повышения результативности мероприятий по сохранению и укреплению здоровья нации.

Профессиональную деятельность специалистов экстремального профиля (спасатели, пожарные, оперативные дежурные, подводники, космонавты, летчики, военнослужащие – участники боевых действий) относят к числу профессий повышенного риска с высоким уровнем профессионального стресса [2]. В особую категорию входят военнослужащие, экстремальные условия работы которых возникают под воздействием чрезвычайных обстоятельств техногенного, природного и биолого-социального характера. Выполнение служебных задач в условиях, сопряженных с риском для жизни и здоровья, ведет к возникновению у военнослужащих стрессовых состояний

и развитию психических расстройств, приводящих к неблагоприятным изменениям личности, социально-психологическим нарушениям жизнедеятельности [3].

Разработка и внедрение медицинских диагностических систем, позволяющих в режиме реального времени отслеживать физическое, физиологическое и психометрическое состояние здоровья военнослужащих и других специалистов особо опасных профессий является актуальной задачей современной медицины и медицинского приборостроения.

В статье представлено решение многоканальной системы мониторинга основных показателей состояния здоровья человека в условиях проведения особо опасной профессиональной деятельности. Задача мониторинга состояния физического, физиологического и психометрического состояния здоровья (на примере военнослужащего) предполагает передачу и обработку информации медицинскому персоналу, обеспечивающему оперативный контроль и оценку нарушения важнейших показателей жизнедеятельности организма для оказания своевременной медицинской помощи.

Современное состояние проблемы

В настоящее время в мире сложилась крайне тревожная ситуация: ежегодно умирают свыше 50 млн человек, из которых свыше 20 млн – трудоспособные люди в возрасте до 60 лет. В структуре заболеваемости и смертности населения доминируют сердечно-сосудистые, онкологические и психические заболевания [4].

Влияние физических и эмоциональных перегрузок увеличивает риск появления психоэмоциональных расстройств и сопутствующих заболеваний, что требует повышения качества диагностической помощи и создания новых форм оказания специализированных медицинских услуг в организациях и на производстве [5].

Психическое здоровье военнослужащих рассматривается как один из основных факторов обороноспособности страны, а совершенствование системы психопрофилактической работы относится к числу важнейших государственных задач [6].

Демографический процесс старения населения развитых стран характеризуется истощением популяции молодого поколения, причем к «пожилым» относят страны со средним возрастом населения 45 лет [7]. Отмечается общая стабилизация и снижение психических заболеваний в развитых странах, при этом подчеркивается высокий уровень распространенности невротических расстройств, связанных со стрессом [8]. По мнению специалистов, причиной может быть неспособность биологических сигнальных систем организма приспособиться к внешним условиям и раздражителям, возникающим в результате ускорения темпа жизни, экономической нестабильности и экологической угрозы [9].

Решение данной проблемы возможно посредством массового внедрения современных информационных технологий, способствующих сохранению и повышению состояния здоровья граждан. Создание комплексированного подхода мониторинга психоэмоционального состояния здоровья возможно при использовании принципов доказательной медицины и дистанционных технологий [10].

Физиологическое состояние человека служит главным критерием для оценки психофизического здоровья и представляет собой набор признаков (паттернов, маркеров), указывающих на состояние его жизнедеятельности. Основной проблемой в области охраны здоровья является недостаточно эффективная диагностика паттернов здоровья, что связано с низкой оперативностью работы персонала первичного и среднего звена медицинских организаций, низкой квалификацией медицинских специалистов (врачей), с завышенной стоимостью обследования и ограниченным временем для проведения обследования пациента [11].

Для оптимизации и обеспечения высокого качества оказания медицинской помощи разрабатывается большое количество специализированных медицинских информационных систем, устройств и приложений, а также расширяется спектр клинических и диагностических услуг для проведения комплексного обследования состояния здоровья пациента [12].

Цифровые системы для здравоохранения

Цифровые системы для здравоохранения представляют собой комплекс мобильных устройств и беспроводных технологий оказания первой, оперативной и прогностической медицинской помощи. На рис. 1 приведена авторская классификация систем мониторинга жизнедеятельности человека. К основным категориям известных систем относятся:

- системы мониторинга работы сердца, мозга, измерения артериального давления, уровня глюкозы в крови;
- многопараметрические системы мониторинга;
- системы удаленного взаимодействия с врачом;
- носимые, имплантируемые и проглатываемые сенсоры различных жизненных показателей;
- диагностические системы и системы быстрого анализа (крови, слюны, мочи, дыхания и т.п.);
- системы для ухода за пожилыми людьми, хронически больными и детьми;
- приложения для контроля здоровья, контроля употребления лекарств, планирования лечения, обучающие системы.

Рассмотрим некоторые примеры известных систем подробнее.

Система непрерывного мониторинга работы сердца MoMe Kardia [13], способная в режиме реального времени обнаружить сердечную аритмию у пациентов за счет суточного измерения ECG, частоты дыхания и движения. Другая система суточного мониторинга артериального давления [14] позволяет пользователю и врачу зарегистрировать и сохранить минимальные изменения кровяного давления, отображая их графически. Следующая система постоянного мониторинга глюкозы [15] позволяет пациенту детально оценить содержание сахара в крови на протяжении всего дня, после приема пищи или физических нагрузок. Монитор сна Rythm Dreem [16] позволяет отслеживать активность головного мозга в формате определения фаз сна с целью его корректировки. Многопараметрический монитор пациента [17] предназначен для комплексного мониторинга состояния пациентов, позволяющий контролировать физические параметры: ECG, NIBP, SpO2, Resp, Temp.

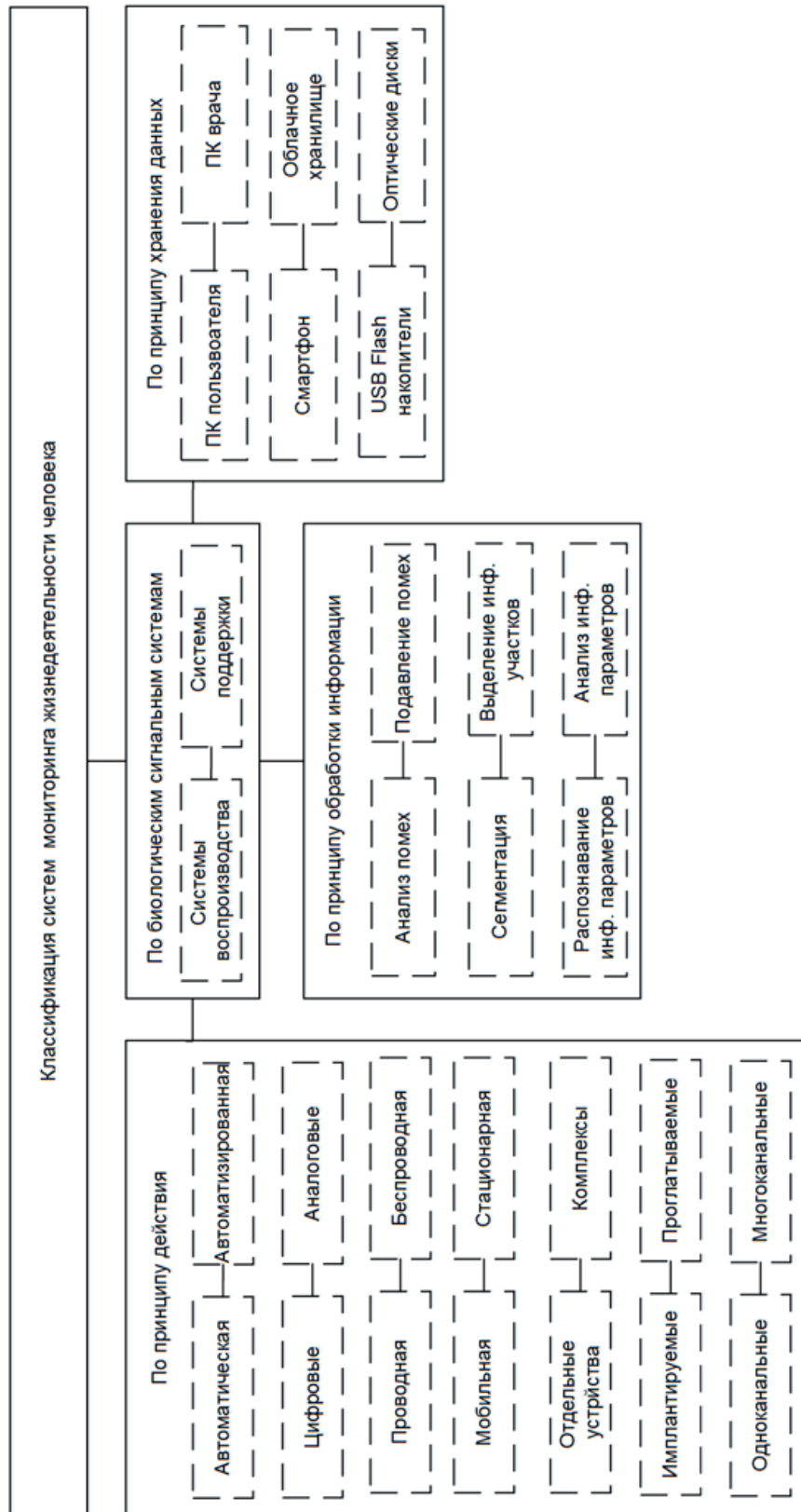


Рис. 1. Классификация систем мониторинга жизнедеятельности

Диагностические системы Tyto Care [18] осуществляют мониторинг параметров здоровья и позволяют врачу удаленно диагностировать состояние пациента путем встроенных в систему веб-камеры, стетоскопа, отоскопа и цифрового термометра. Система SensoGenic [19] предназначена для обнаружения аллергенов в продуктах пищеварения.

В работе представлен небольшой перечень ярких примеров известных и внедряемых систем для целей развития цифрового здравоохранения. Известные системы обеспечивают длительный, проводной/беспроводной мониторинг состояния здоровья человека. Однако несмотря на существенные достоинства, на рынке по-прежнему отсутствуют специализированные медицинские системы, способные обеспечить оперативный и эффективный контроль за комплексом параметров физического, физиологического и психометрического состояния здоровья человека. Особенно это важно для категории военнослужащих, находящихся в особо опасных условиях.

Трекер-системы для регистрации основных показателей жизнедеятельности

Трекер-системы представляют собой мобильные носимые устройства регистрации основных показателей здоровья человека, обеспечивающих непрерывный мониторинг физиологических, физических и психометрических показателей жизнедеятельности. Данная категория устройств не относится к медицинским. Однако их использование для оперативной оценки первичных изменений состояния здоровья человека, находящегося в условиях высокой психоэмоциональной нагрузки, представляется актуальным [20].

Известные трекер-системы обеспечивают выполнение ряда важных функций: оценка пройденного расстояния, контроль сердечного ритма, определение уровня калорий и т.д. Кроме того, ключевой особенностью известных систем является передача информации на смартфон или внешний компьютер (сервер, облачное хранилище данных), что позволяет регистрировать состояние здоровья одновременно сразу с нескольких пользователей, находящихся в прямом контакте в момент выполнения особо опасной работы, например боевого задания у военнослужащих. Также следует отметить вандалостойкость, влаго- и пылезащищенность известных трекер-систем, что позволяет использовать их в различных погодных условиях (на суше, в воде). Примерами подобных систем являются: Xiaomi Mi Band, Huawei Band, Garmin Vivosmart, GSGMIN CD01 и др. Основные технические характеристики трекер-систем представлены в табл. 1.

Недостатками трекер-систем являются возникновение неприятных ощущений, зуда и покраснениями кожи при длительном использовании [21]. Также системы имеют погрешность в измерении [22]. Существенным недостатком является невозможность подключить одновременно несколько трекер-систем к одному устройству для реализации принципа многоканальности по обработке данных [23]. Данный недостаток устраняется созданием многоканальной системы приема/передачи. Суть системы заключается в параллельной регистрации физиологических сигналов от различных пользователей с помощью трекер-систем на многоканальное устройство посредством открытого стандарта беспроводной связи BLU 5.0.

Таблица 1

Технические характеристики известных трекер-систем

Наименование	Основные технические характеристики		
	<i>Протокол передачи</i>	<i>Сенсоры</i>	<i>Степень защиты</i>
Xiaomi Mi Smart Band 4	Bluetooth 5.0 LE,	3-осевой акселерометр, гироскоп, пульсометр	IP68 5 ATM
Huawei Band 4 Pro	Bluetooth 4.2 BLE	3-осевой акселерометр, 3-осевой гироскоп, пульсометр, GPS	WR50
Garmin Vivosmart 4	Bluetooth, ANT+	акселерометр, высота, подсветка, пульсометр	WR50
GSMIN CD01	Bluetooth 4.0	пульсометр, акселерометр, уровень кислорода в крови, ЭКГ	IP67

**Многоканальная система приема/передачи
основных показателей жизнедеятельности**

В соответствии с представленным выше описанием предложена концепция новой многоканальной системы приема/передачи основных показателей жизнедеятельности человека, находящегося в особо опасных условиях. Разрабатываемая система должна обладать возможностью выполнения следующих основных функций:

– измерение показателей жизнедеятельности: артериальное давление, частота сердечных сокращений, уровень кислорода в крови и ЭКГ, вычисление показаний физической активности и местоположения пользователя;

– сбор данных о пользователе и передача на пункт обработки для определения информативно-значимых параметров диагностических измерений и необходимой управляющей программы. Под управляющей программой понимается программа медицинского осмотра пользователя по проведению обследования основных физиологических параметров жизнедеятельности с наиболее полным исследованием проблемных (критических) состояний отдельных органов, систем. По полученной информации и результатам предварительного осмотра управляющая программа регистрирует данные о возможных причинах отклонений в состоянии физического, физиологического и психометрического состояния здоровья пациента или функционирования исследуемых биологических сигнальных систем;

– постановка предварительного заключения, выдача полученных результатов в электронном виде и принятие решения.

Многоканальная система мониторинга основных показателей здоровья человека в период экстремальных условий должна включать в себя устройства регистрации основных показателей жизнедеятельности, передающее устройство, приемник-передатчик сигналов, рабочее место врача/специалиста с визуальным отображением основных показателей в режиме реального времени. Таким образом, предлагаемая система будет направлена на осуществление полного оперативного и эффективного обследования, проводимого медицинским специалистом. Структурная схема предлагаемой системы приведена на рис. 1 и включает в себя устройство регистрации основных параметров физиологической активности, передающие устройства, приемное устройство, блок обработки и визуализации полученной информации.

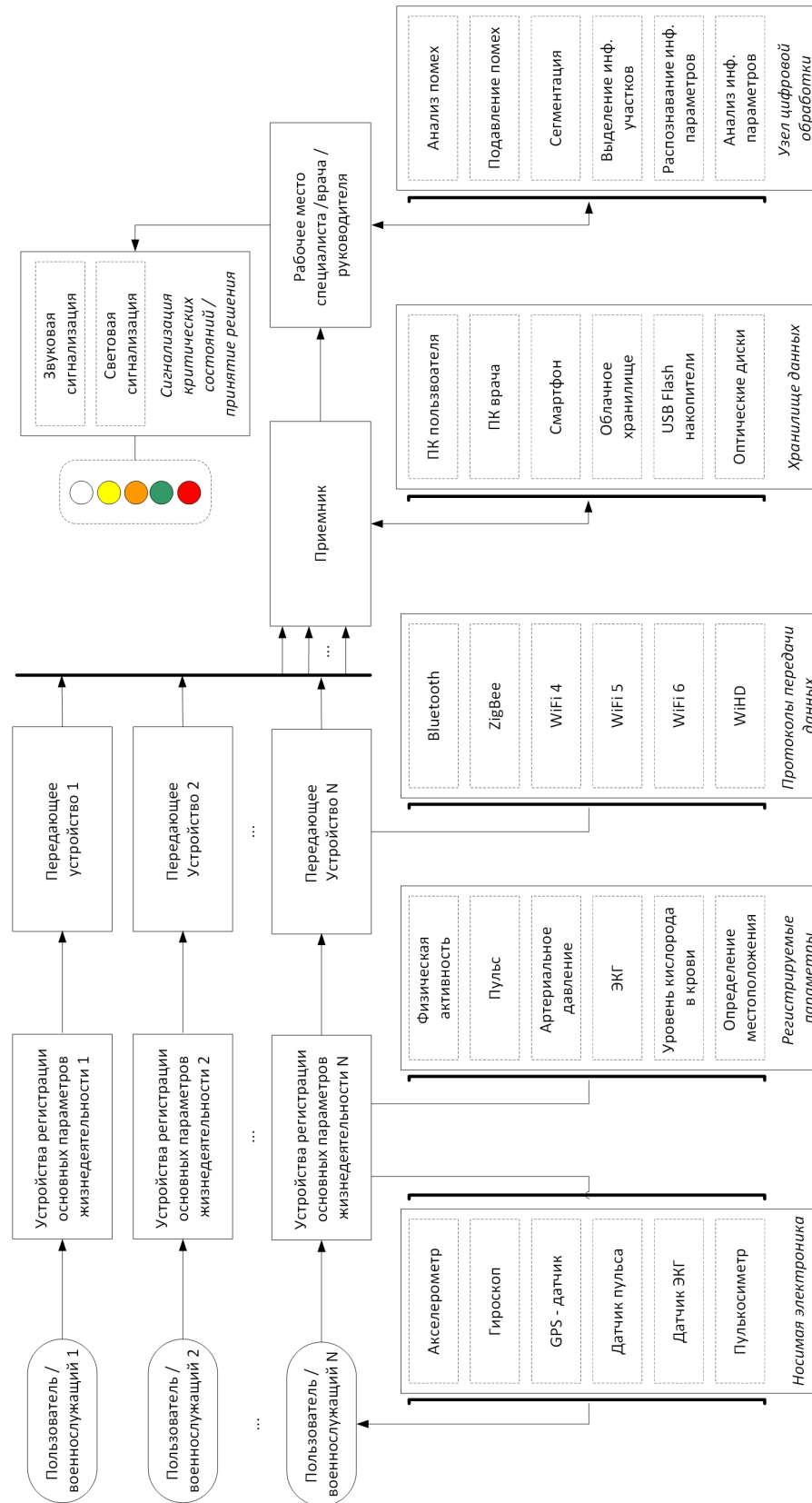


Рис. 1. Структура многоканальной системы мониторинга основных показателей здоровья человека

Ключевыми характеристиками разрабатываемой системы является:

- устройство регистрации основных показателей здоровья (трекер-система), обладающее широким функционалом возможностей, представленных в компактной и удобной форме для пользователя;

- использование беспроводной технологии передачи данных BLU 5.0 в процессе передачи информации с трекер-системы в многоканальное приемопередающее устройство осуществляется с высокой скоростью, в том числе с шифрованием, с высокой надежностью и устойчивостью к электромагнитным помехам;

- использование оригинальных модулей сбора основных параметров здоровья одновременно с нескольких трекер-систем с последующей передачей по радиоканалу на пункт управления и возможностью передачи на дальние расстояния с использованием ретранслятора.

- информация, принятая на пункте управления, отображается на экране специалиста медицинской службы управляющей программы в виде значения основных параметров и средств индикации оповещений с места событий.

Комплексный анализ информации о физиологическом состоянии одновременно множества пользователей позволит специалисту в режиме реального времени принять оперативное правильное решение о дальнейших действиях обследуемых, их психоэмоциональном уровне расстройства и возможности дальнейшего выполнения поставленных задач.

Заключение

В работе представлена многоканальная система мониторинга основных показателей здоровья человека в условиях выполнения особо опасной профессиональной деятельности. Представленная система осуществляет сбор, передачу, обработку и понятийное отображение информации о критическом состоянии здоровья, а именно пограничном уровне артериального давления и частоте сердечных сокращений, пройденном расстоянии (в случае спасательных работ), расходе калорий и уровне физической активности человека. Суть системы заключается в параллельной регистрации физиологических сигналов от различных пользователей с помощью трекер-систем на многоканальное устройство приема/передачи посредством открытого стандарта беспроводной связи BLU 5.0.

Список литературы

1. Тычков А. Ю., Агейкин А. В., Алимуратов А. К., Калистратов В. Б., Митрошина С. Ю. Современные представления о специфике и проблемах диагностики пограничных психических расстройств // Психическое здоровье. 2017. № 5 (132). С. 69–75.
2. Чермянин С. В. Психология чрезвычайных и экстремальных ситуаций. СПб. : Ай-синг, 2015. 208 с.
3. Сысоев В. Н. Индивидуальное здоровье военнослужащих и задачи военной медицины // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2009. № 3. С. 137–141.
4. Агейкин А. В., Тычков А. Ю., Алимуратов А. К., Горбунов В. Н., Рева Е. К., Межина В. А., Колесова Е. В., Калистратов В. Б., Мельников В. Л., Макарова Н. А. Оценка влияния стрессовой ситуации на психическое здоровье в условиях чрезвычайных ситуаций по видеоконтенту // Психическое здоровье. 2020. № 9. С. 46–52.

5. Физиология военного труда / под ред. В. Н. Сысоева. СПб. : Изд-во Любавич, 2011. 455 с.
6. Солодков А. С., Сологуб Е. Б. Возрастная физиология : учеб. пособие. СПб. : ГАФК им. П.Ф. Лесгафта, 2001. 187 с.
7. Болехан В. Н., Иванов В. В., Ивченко Е. В., Крассий А. Б., Моровикова Т. В., Нагибович О. А., Резванцев М. В. Медицинское обеспечение ветеранов вооруженных сил за рубежом (на примере США и Великобритании) // Военно-медицинский журнал. 2013. № 3. С. 61–67.
8. Сивашенко П. П., Иванов В. В., Григорьев С. Г., Барановский А. М. Новые подходы к комплексной оценке состояния здоровья военнослужащих // Военно-медицинский журнал. 2013. № 5. С. 13–18.
9. Фисун А. Я. Медицинское обеспечение ВС РФ: состояние и пути совершенствования // Военно-медицинский журнал. 2014. № 1. С. 4–16.
10. Литвинцев С. В., Снедков Е. В., Резник А. М. Боевая психическая травма. М. : Медицина, 2005. 432 с.
11. Борисов Д. Н., Лемешкин Р. Н., Хилько В. О. Контроль за состоянием здоровья военнослужащих в ходе проведения лечебно-эвакуационного обеспечения войск (сил) с использованием современных средств информатизации // Военная мысль. 2017. № 4. С. 47–55.
12. Григорьев А. И. Информационные и коммуникационные технологии в деятельности военно-медицинской службы ВС РФ // Военная мысль. 2011. № 4. С. 36–53.
13. AliveCor. URL: <https://www.alivecor.com/kardiamobile> (дата обращения: 15.01.2021).
14. MEDICAL Mobility in Healthcare. URL: <https://gmedinnovations.com/> (дата обращения: 15.01.2021).
15. MOCACuff – Wrist Blood Pressure Monitor. URL: <https://mocacare.com/mocacuff/> (дата обращения: 15.01.2021).
16. Health Care Originals – Breathe easy, always. URL: <http://healthcareoriginals.com/> (дата обращения: 15.01.2021).
17. Asthma Control in Your Pocket. URL: <https://smartasthma.com/> (дата обращения: 15.01.2021).
18. Spire. URL: <https://www.spirehealth.com/> (дата обращения: 17.10.2020).
19. TytoCare|On Demand Medical Exams. Anytime. Anywhere. URL: <https://www.tytoCare.com/> (дата обращения: 15.01.2021).
20. Демкин А. Д. Современное состояние, а также перспективы развития зарубежных технологий в области психофизиологического обеспечения надежности профессиональной деятельности военнослужащих. 2018. URL: <https://onkto.ru/images/docs/RT-PSM.pdf> (дата обращения 15.01.2021).
21. Баянов Д. Д., Голембиовский М. М., Княгинин Д. А. Разработка браслета для мониторинга состояния военнослужащего // Научные исследования в эпоху глобализации : сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2016. С. 21–23.
22. Юрченко Н. Ю., Соседов А. И. Оценка перспектив развития мобильной медицины // Инновации и инвестиции. 2019. № 5. С. 298–304.
23. Демкин А. Д., Нагибович О. А., Васильченко В. В. Военное применение систем для удаленного физиологического и психофизиологического мониторинга в вооруженных силах иностранных государств // Известия российской военно-медицинской академии. 2019. № 3. С. 183–186.

References

1. Tychkov A.Yu., Ageykin A.V., Alimuradov A.K., Kalistratov V.B., Mitroshina S.Yu. Modern ideas about the specifics and problems of diagnosis of borderline mental disorders. *Psikhicheskoe zdorov'e = Mental health*. 2017;5(132):69–75. (In Russ.)

2. Chermyanin S.V. *Psikhologiya chrezvychaynykh i ekstremal'nykh situatsiy* = *Psychology of emergencies and extreme situations*. Saint-Petersburg: Aysing, 2015:208. (In Russ.)
3. Sysoev V.N. Individual health of military personnel and tasks of military medicine. *Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii* = *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2009;3:137–141. (In Russ.)
4. Ageykin A.V., Tychkov A.Yu., Alimuradov A.K., Gorbunov V.N., Reva E.K., Mezhdina V.A., Kolesova E.V., Kalistratov V.B., Mel'nikov V.L., Makarova N.A. Assessment of the impact of a stressful situation on mental health in emergency situations using video content. *Psikhicheskoe zdorov'e* = *Mental health*. 2020;9:46–52. (In Russ.)
5. Sysoev V.N. (ed.) *Fiziologiya voennogo truda* = *Physiology of military labor*. Saint-Petersburg: Izd-vo Lyubavich, 2011:455. (In Russ.)
6. Solodkov A.S., Sologub E.B. *Vozrastnaya fiziologiya: ucheb. posobie* = *Age physiology: a textbook*. Saint-Petersburg: GAFK im. P.F. Lesgafta, 2001:187. (In Russ.)
7. Bolekhan V.N., Ivanov V.V., Ivchenko E.V., Krassiy A.B., Morovikova T.V., Nagibovich O.A., Rezvantsev M.V. Medical support for veterans of the armed forces abroad (by the example of the United States and Great Britain). *Voennomeditsinskiy zhurnal* = *Military Medical Journal*. 2013;3:61–67. (In Russ.)
8. Sivashchenko P.P., Ivanov V.V., Grigor'ev S.G., Baranovskiy A.M. New approaches to a comprehensive assessment of the health status of servicemen. *Voennomeditsinskiy zhurnal* = *Military Medical Journal*. 2013;5:13–18. (In Russ.)
9. Fisun A.Ya. Medical support of the RF Armed Forces: state and ways of improvement. *Voennomeditsinskiy zhurnal* = *Military Medical Journal*. 2014;1:4–16. (In Russ.)
10. Litvintsev S.V., Snedkov E.V., Reznik A.M. *Boevaya psikhicheskaya travma* = *Combat mental trauma*. Moscow: Meditsina, 2005:432. (In Russ.)
11. Borisov D.N., Lemeshkin R.N., Khil'ko V.O. Monitoring the health status of military personnel in the course of medical and evacuation support of troops (forces) using modern media. *Voennaya mysl'* = *Military thought*. 2017;4:47–55. (In Russ.)
12. Grigor'ev A.I. Information and communication technologies in the activities of the military medical service of the Russian Federation Armed Forces. *Voennaya mysl'* = *Military thought*. 2011;4:36–53. (In Russ.)
13. *AliveCor*. Available at: <https://www.alivecor.com/kardiamobile> (accessed 15.01.2021).
14. *MEDICAL Mobility in Healthcare*. Available at: <https://gmedinnovations.com/> (accessed 15.01.2021).
15. *MOCACuff – Wrist Blood Pressure Monitor*. Available at: <https://mocasuff.com/mocacuff/> (accessed 15.01.2021).
16. *Health Care Originals – Breathe easy, always*. Available at: <http://healthcareoriginals.com/> (accessed 15.01.2021).
17. *Asthma Control in Your Pocket*. Available at: <https://smartasthma.com/> (accessed 15.01.2021).
18. *Spire*. Available at: <https://www.spirehealth.com/> (accessed 17.10.2020).
19. *TytoCare|On Demand Medical Exams. Anytime. Anywhere*. Available at: <https://www.tytocare.com/> (accessed 15.01.2021).
20. Demkin A.D. *Sovremennoe sostoyanie, a takzhe perspektivy razvitiya zarubezhnykh tekhnologiy v oblasti psikhofiziologicheskogo obespecheniya nadezhnosti professional'noy deyatel'nosti voennosluzhashchikh* = *The current state and the prospects for the development of foreign technologies in the field of psychophysiological assurance of the reliability of the military personnel's professional activities*. 2018. (In Russ.). Available at: <https://onkto.ru/images/docs/RT-PSM.pdf> (accessed 15.01.2021).
21. Bayanov D.D., Golembiovskiy M.M., Knyagin D.A. Development of a bracelet for monitoring the condition of a serviceman. *Nauchnye issledovaniya v epokhu globalizatsii: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* = *Scientific research in the era of globalization: proceedings of an International scientific and practical conference*. Ufa, 2016:21–23. (In Russ.)

22. Yurchenko N.Yu., Sosedov A.I. Assessment of the prospects for the development of mobile medicine. *Innovatsii i investitsii = Innovation and investment*. 2019;5:298–304. (In Russ.)
23. Demkin A.D., Nagibovich O.A., Vasil'chenko V.V. Military application of systems for remote physiological and psychophysiological monitoring in the armed forces of foreign states. *Izvestiya rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii = Proceedings of the Russian Military and Medical Academy*. 2019;3:183–186. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук, заведующий кафедрой радиотехники и радиоэлектронных систем, заместитель директора научно-исследовательского института фундаментальных и прикладных исследований, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Aleksandr Yu. Tychkov

Doctor of engineering sciences, head of the sub-department of radio engineering and radioelectronic systems, deputy director of the Research Institute for Basic and Applied Studies, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Никита Андреевич Бутров

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: butrov.nikita@yandex.ru

Nikita A. Butrov

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алан Казанферович Алимуратов

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем, директор студенческого научно-производственного бизнес-инкубатора, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

Candidate of engineering sciences, associate professor of the sub-department of radio engineering and radioelectronic systems, director of the student research and production business incubator, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Артём Павлович Назарычев

студент, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: rtech@pnzgu.ru

Artem P. Nazarychev

Student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 29.03.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.04.2021

Принята к публикации / Accepted 17.04.2021

УДК 004.451.26

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-2

Проблематика обработки транзакций при использовании микросервисной архитектуры

Д. С. Фомин¹, А. В. Бальзамов²

^{1,2}Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет имени Н. П. Огарева, Саранск, Россия

¹nkfominsa@gmail.com, ²veron13rus@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является система электронной коммерции, построенная по принципу микросервисной архитектуры. Предметом исследования являются методы обеспечения корректной работы с транзакциями при использовании микросервисной архитектуры. Цель работы – поиск оптимального метода для решения проблемы обработки транзакций при использовании микросервисной архитектуры. *Материалы и методы.* Исследования проводились в области архитектурных решений при построении высоконагруженных систем электронной коммерции. Использовались методы двухфазной фиксации для обработки транзакций и паттерн-компенсационной транзакции – «Сага». *Результаты.* Проведен анализ особенностей работы с транзакциями и предложены методы решения проблемы обработки транзакций в системах, построенных с использованием микросервисной архитектуры. *Выводы.* Рассмотренные подходы, как правило, предполагают введение дополнительного сервиса (Координатора транзакций или Оркестратора Саги), которые управляют жизненным циклом транзакций, что несколько увеличивает затраты на разработку и ее сложность. Применяя описанные методы решения, система становится более отказоустойчивой, масштабируемой.

Ключевые слова: микросервисная архитектура, транзакция, база данных, сервис, бизнес-процесс

Для цитирования: Фомин Д. С., Бальзамов А. В. Проблематика обработки транзакций при использовании микросервисной архитектуры // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 15–23. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-2

The problem of transaction processing using microservice architecture

D.S. Fomin¹, A.V. Bal'zamorov²

^{1,2}Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

¹nkfominsa@gmail.com, ²veron13rus@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is an e-commerce system built on the principle of microservice architecture. The subject of the research is methods of ensuring correct operation of transactions using a microservice architecture. The purpose of the work is to find an optimal method for solving the problem of processing transactions using a microservice architecture. *Materials and methods.* Research was carried out in the field of architectural solutions for the construction of high-load e-commerce systems. Two-phase commit methods were used to process transactions and a pattern-compensating transaction – “Saga”. *Results.* The research analyzes the features of working with transactions and pro-

poses methods for solving the problem of processing transactions in systems built using a microservice architecture. *Conclusions.* The approaches considered, as a rule, involve the introduction of additional services (Transaction Coordinator or Saga Orchestrator) that manage the life cycle of transactions, which increases development costs and complexity. Applying the described solution methods, the system becomes more fault-tolerant and scalable.

Keywords: microservice architecture, transaction, database, service, business process

For citation: Fomin D.S., Bal'zamov A.V. The problem of transaction processing using microservice architecture. *Izvestiya vysshihkh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;2:15–23. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-2

Введение

При использовании классической монолитной архитектуры приложения зачастую используется единое централизованное хранилище данных (база данных), где имеется доступ сразу ко всем бизнес-объектам системы и при выполнении сложных бизнес-процессов можно использовать транзакции для повышения безопасности и целостности данных [1].

Как пример можно рассмотреть (рис. 1) использование транзакции в монолитной системе электронной коммерции.

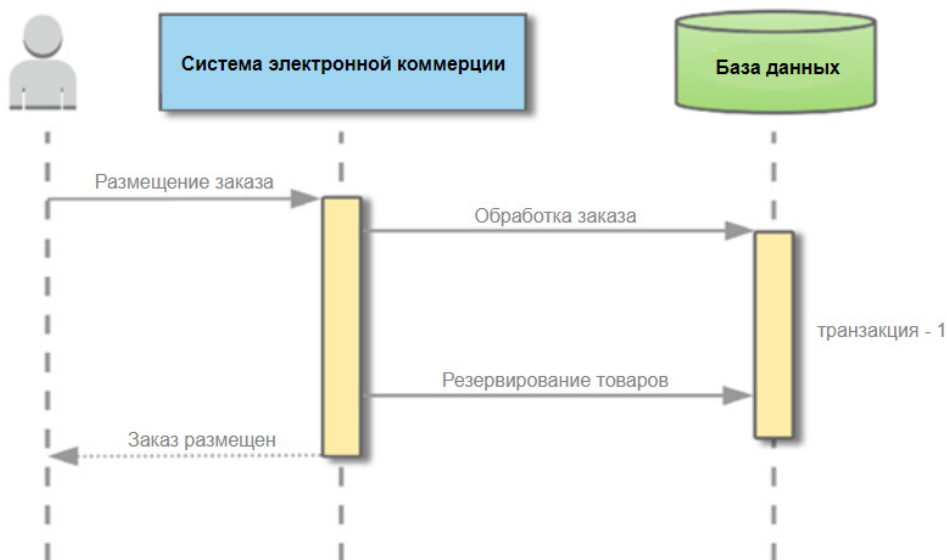


Рис. 1. Пример использования транзакции в монолитной системе электронной коммерции

В данном примере пользователь отправляет запрос на оформление заказа в систему, система создает транзакцию локальной базы данных, которая работает с несколькими таблицами базы данных, чтобы обработать заказ и зарезервировать элементы из инвентаря. Если какой-либо шаг не удастся, транзакция, заказ и зарезервированные позиции могут вернуться в первоначальное состояние. Все данные бизнес-операции выполняются в рамках одной транзакции.

Транзакции позволяют выполнить набор операций в базе данных, исполняясь как атомарная операция. Это говорит о том, что если одна команда из набора в транзакции выполнится с ошибкой, то вся транзакция будет полностью отклонена [2]. Принцип атомарности соответствует требованиям *ACID* (*Atomicity, Consistency, Isolation, Durability* – Атомарность, Последовательность, Изоляция, Долговечность), которые гарантируются системой управления базой данных [3].

При использовании «чистой» микросервисной архитектуры у каждого сервиса, который работает с бизнес-объектами, должна быть своя база данных для их обработки и хранения [4] (рис. 2).

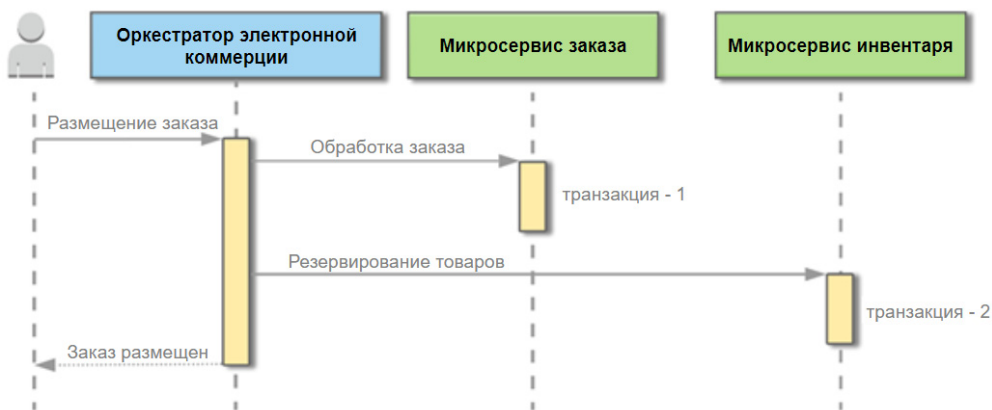


Рис. 2. Пример системы электронной коммерции с использованием микросервисной архитектуры

При перестроении системы на микросервисную архитектуру выделяются все бизнес-процессы и их объекты, связанные с заказом в отдельный сервис «Микросервис заказа», а объекты и бизнес-процессы, связанные с резервированием и работой с элементами инвентаря, – в «Микросервис инвентаря» [5]. Теперь, когда от пользователя приходит запрос на оформление заказа, сначала данные передаются в «Микросервис заказа», где они обрабатываются и сохраняются, а затем последовательно или параллельно данные отправляются в «Микросервис инвентаря», где также выполняются свои бизнес-процессы в своей базе данных.

Поскольку теперь один бизнес-процесс «Размещение заказа» выполняется в разных сервисах и, как следствие, в разных базах данных, то нет возможности выполнить *ACID*-требования и возникают следующие проблемы:

1. Сохранение атомарности транзакции. Как говорилось выше, атомарность транзакции означает, что в транзакции либо завершены все операции, либо ни одна из операций не завершена и транзакция полностью откатывается. В приведенном выше примере, если бизнес-процессу, который занимается «резервированием товаров в инвентаре» в сервисе «Микросервис инвентаря», не удастся провести резервирование или возникнут ошибки, необходимо откатить изменения бизнес-процесса «создания и обработки заказа», которые были применены в сервисе «Микросервис заказа» [6].

2. Обработка параллельных запросов, связанных с объектами, которые участвуют в исполняющемся бизнес-процессе. Так как теперь используется микросервисная архитектура, то бизнес-процесс по оформлению заказа

состоит из двух этапов (или из двух транзакций): выполнение всех бизнес-процессов по созданию и обработке заказа в сервисе «Микросервис заказа» и выполнение всех бизнес-процессов по резервированию элементов в «Микросервисе инвентаря». При исполнении бизнес-процесса оформления заказа, когда «Микросервис заказа» находится в стадии завершения исполнения своих бизнес-процессов, а сервис «Микросервис инвентаря» находится в стадии выполнения, при поступлении параллельного запроса, связанного с объектами «заказов», необходимо включать в набор данных заказ, даже если основной бизнес-процесс еще не завершен [6].

Две вышеупомянутые проблемы очень важны при проектировании и создании приложений или систем на основе микросервисной архитектуры. Для решения данных проблем существует несколько основных методов:

- 1) метод двухфазной фиксации;
- 2) паттерн «Сага» [7].

1. Метод двухфазной фиксации

Как следует из названия, этот способ обработки транзакций состоит из двух этапов: фазы подготовки и фазы фиксации. Одним из важных участников является координатор транзакции, который поддерживает жизненный цикл транзакции [7].

При исполнении основного бизнес-процесса по оформлению заказа все сервисы создают у себя в локальных базах данных транзакции и отправляют уведомление координатору о готовности их фиксации. Затем по готовности всех сервисов, участвующих в основном бизнес-процессе, координатор транзакций отправляет команду всем сервисам о применении фиксации в случае успеха или команду отката в случае ошибок или иных обстоятельств [8].

Пример системы электронной коммерции с использованием микросервисной архитектуры и координатора транзакций изображен на рис. 3.

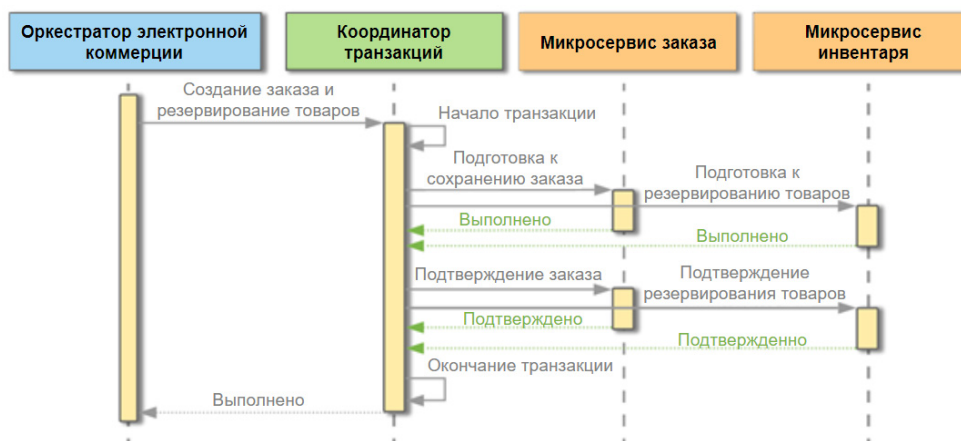


Рис. 3. Пример системы электронной коммерции с использованием микросервисной архитектуры и координатора транзакций

В приведенном выше примере, когда пользователь отправляет запрос на оформление заказа, «Координатор транзакций» создает виртуальную глобальную транзакцию со всей контекстной информацией. Затем данные от-

правляются в «Микросервис заказа» для исполнения бизнес-процессов по созданию и обработке заказа и подготовке локальной транзакции. После этого данные отправляются в «Микросервис инвентаря» для исполнения бизнес-процессов по резервированию элементов инвентаря и подготовке локальной транзакции. Когда все сервисы готовы, они уведомляют координатора транзакций о готовности фиксации и блокируют объекты от дальнейших изменений. Как только все сервисы уведомляют «Координатор транзакций» об исполнении всех своих бизнес-процессов и готовности фиксации транзакции, он отправляет команду этим сервисам о применении их фиксации. Затем данные сервисы применяют фиксацию транзакции и далее все объекты будут разблокированы [8].

Также необходимо рассмотреть процесс в случае возникновения ошибки и невозможности одним из сервисов применения фиксации транзакции. Данный процесс изображен на рис. 4.

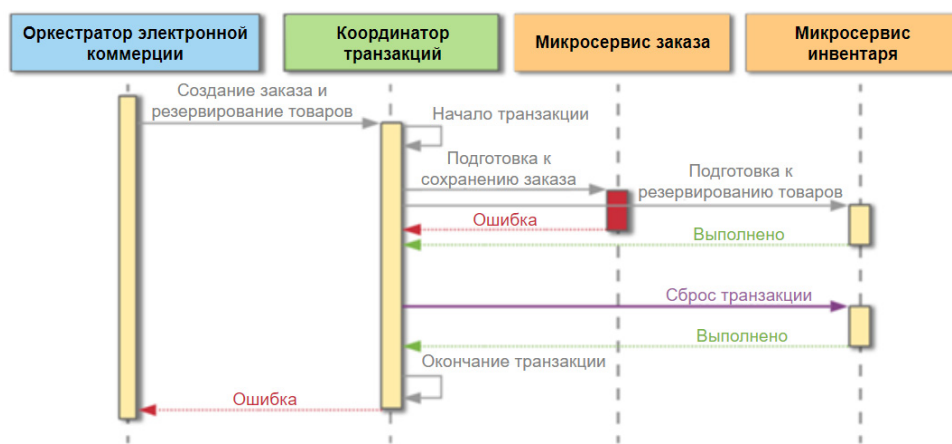


Рис. 4. Пример системы электронной коммерции с использованием микросервисной архитектуры и координатора транзакций в случае сбоя бизнес-процесса

В сценарии сбоя основного бизнес-процесса по оформлению заказа, если в какой-то момент один из сервисов не может выполнить все свои бизнес-процессы и подготовить локальную транзакцию к фиксации, то «Координатор транзакций» прервет свою виртуальную глобальную транзакцию и начнет процесс отката. Как показано на рис. 4, сервис «Микросервис заказа» не смог выполнить свои бизнес-процессы по созданию и обработке заказа, но сервис «Микросервис инвентаря» уведомил, что выполнил все свои бизнес-процессы по резервированию элементов инвентаря и перевел локальную транзакцию к стадии фиксации. В этом случае «Координатор транзакций» отправит команду отката транзакции сервису «Микросервис инвентаря», тем самым весь бизнес-процесс будет отменен, объекты будут разблокированы и никакие изменения не попадут в локальные базы данных сервисов [9].

Рассмотренный метод имеет следующие преимущества:

1. Подход гарантирует атомарность транзакции. Транзакция завершится либо при успешном завершении всех бизнес-процессов во всех участвующих сервисах, либо все базы данных останутся в начальном состоянии.
2. Во-вторых, метод позволяет изолировать чтение и запись, изменения объектов не видны, пока координатор транзакций не зафиксирует изменения.

3. Подход может представлять собой синхронный вызов, при котором клиент будет уведомлен об успехе или неудаче.

Также нельзя исключить следующие недостатки указанного метода:

1. Двухфазная фиксация выполняется довольно медленно по сравнению со временем работы одного сервиса. Они сильно зависят от координатора транзакций, что действительно может замедлить работу системы при высокой нагрузке.

2. Другой главный недостаток – блокировка строк базы данных. Блокировка может стать узким местом производительности, и возможна тупиковая ситуация, когда две транзакции взаимно блокируют друг друга.

2. Паттерн «Сага»

Паттерн «Сага» представляет собой набор локальных транзакций [10]. Каждая локальная транзакция обновляет базу данных и публикует сообщение или событие, инициируя следующую локальную транзакцию в саге. Если транзакция завершилась неудачей, например из-за нарушения бизнес-правил, тогда сага запускает компенсирующие транзакции, которые откатывают изменения, сделанные предшествующими локальными транзакциями. В этом подходе распределенная транзакция выполняется асинхронными локальными транзакциями на связанных микросервисах. Микросервисы связываются друг с другом через шину событий [4].

Существует два способа координации саг:

- Хореография (*Choreography*) – каждая транзакция публикует события, которые запускают транзакции в других сервисах.
- Оркестровка (*Orchestration*) – оркестратор говорит участникам, какие транзакции должны быть запущены.

В качестве примера можно рассмотреть ранее описанную систему электронной коммерции с использованием микросервисной архитектуры и паттерна «Сага» (рис. 5).



Рис. 5. Пример системы электронной коммерции с использованием микросервисной архитектуры и паттерна «Сага»

В приведенном выше примере, когда клиент отправляет запрос на оформление заказа, «Хореограф» генерирует событие «Создание заказа», означающее начало транзакции. В свою очередь «Микросервис заказа» прослушивает это событие и запускает бизнес-процессы, связанные с созданием и обработкой заказа, и, если он был успешным, генерирует событие «Заказ создан». После этого «Хореограф», получая событие от «Микросервиса заказа» об успешном создании и обработке заказа переходит к резервированию предметов, генерируя событие «Резервирование товаров». «Микросервис ин-

вентаря» также отслеживает это событие и запускает бизнес-процессы, связанные с резервированием элементов, и в случае успеха генерирует событие «Товары зарезервированы». Данное событие сигнализирует «Хореографу» об успешном выполнении всего основного бизнес-процесса по оформлению заказа и конце саги (транзакций) [11].

Вся связь на основе событий между микросервисами происходит через шину событий и оркестрируется другой системой для решения проблемы сложности [12].

На рис. 6 изображен сценарий сбоя основного бизнес-процесса по оформлению заказа. Например, если по какой-либо причине «Микросервису инвентаря» не удалось выполнить все свои бизнес-процессы по резервированию элементов, он генерирует событие «Ошибка резервирования товаров». «Хореограф», получая данное событие, запускает «компенсационную транзакцию», генерируя событие «Удаление заказа». «Микросервис заказа» прослушивает это событие и запускает бизнес-процесс и соответствующие транзакции по удалению данного заказа [13].

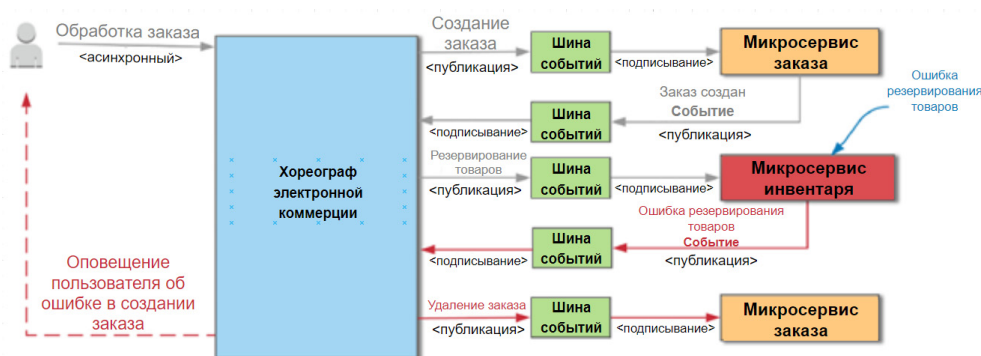


Рис. 6. Пример системы электронной коммерции с использованием микросервисной архитектуры и паттерна «Сага» в случае сбоя бизнес-процесса

Одним из больших преимуществ этого подхода является то, что каждый микросервис фокусируется только на своей атомарной транзакции. Микросервисы не блокируются, если другой сервис занимает больше времени. Это также означает, что блокировка базы данных не требуется. Использование этого подхода делает систему хорошо масштабируемой при большой нагрузке благодаря решению, основанному на асинхронных событиях [11, 14].

Основным недостатком этого подхода является отсутствие изоляции чтения. Это означает, что в приведенном выше примере клиент мог видеть, что заказ был создан, но в следующую секунду заказ удаляется из-за компенсирующей транзакции. Кроме того, когда количество микросервисов увеличивается, их становится труднее отлаживать и поддерживать [11, 15].

Заключение

Рассмотренные подходы по обработке распределенных транзакции достаточно актуальны в настоящее время, так как популярность микросервисной архитектуры из года в год становится все выше. Рассмотренные в данной статье проблемы, подходы для их решения с преимуществами и недостатками дают разработчикам целостную картину по работе с данными и их источ-

никами в рамках микросервисной архитектуры. Эти подходы как правило предполагают введение дополнительного сервиса («Координатора транзакций» или «Оркестратора Саги»), которые управляют жизненным циклом транзакций, что несколько увеличивает затраты на разработку и ее сложность. Применяя данные методы решения, система становится более отказоустойчивой, масштабируемой и, наверное, без неопределенного поведения при выполнении серьезных бизнес-процессов, связанных с различными источниками данных.

Список литературы

1. Фаулер М. Шаблоны корпоративных приложений. М. : Диалектика-Вильямс, 2019. 546 с.
2. Лейн К., Черети М. Базы данных. Инжиниринг надежности. СПб. : Питер, 2020. 304 с.
3. Баженова И. Ю. Разработка распределенных приложений баз данных : курс лекций. М. : МГУ им. М. В. Ломоносова, 2006. 203 с.
4. Мартин Р. Чистая архитектура. Искусство разработки программного обеспечения. СПб. : Питер, 2018. 352 с.
5. Ильин В. В. Моделирование бизнес-процессов. Практическое использование ARIS. М. : Диалектика-Вильямс, 2006. 176 с.
6. Goetsch K. Microservices for Modern Commerce: Report. CA : O'Reilly Media, 2017. P. 25–47.
7. Проблематика распределенных транзакций в контексте микросервисной архитектуры. URL: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/516720/> (дата обращения: 08.03.2021).
8. Nadareishvili I., Mitra R., McLarty M., Amundsen M. Microservice architecture. CA : O'Reilly Media, 2016. P. 25–38.
9. Committing a Transaction in Single-Phase and Multi-Phase. URL: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/framework/data/transactions/committing-a-transaction-in-single-phase-and-multi-phase> (дата обращения: 07.03.2021).
10. Saga distributed transactions. URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/architecture/reference-architectures/saga/saga> (дата обращения: 08.03.2021).
11. Saga pattern and distributed transactions. URL: <https://bool.dev/blog/detail/saga-pattern-i-raspredelennye-tranzaktsii> (дата обращения: 08.03.2021).
12. Применение паттерна saga. URL: <https://medium.com/@evgenzt/%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%BF%D0%B0%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B0%D0%B3%D0%B0-7eead841d90f> (дата обращения: 08.03.2021).
13. Sagas. URL: <https://microservices.io/patterns/data/saga.html> (дата обращения: 08.03.2021).
14. Паттерн: Saga. URL: <https://itnan.ru/post.php?c=1&p=427705> (дата обращения: 09.03.2021).
15. Паттерн: Saga. URL: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/519636/> (дата обращения: 09.03.2021).

References

1. Fauler M. *Shablony korporativnykh prilozheniy = Enterprise application templates*. Moscow: Dialektika-Vil'yams, 2019:546. (In Russ.)
2. Leyn K., Chereti M. *Bazy dannykh. Inzhiniring nadezhnosti = Database. Reliability engineering*. Saint-Petersburg: Piter, 2020:304. (In Russ.)
3. Bazhenova I.Yu. *Razrabotka raspredelennykh prilozheniy baz dannykh: kurs lektsiy = Developing distributed database applications: a course of lectures*. Moscow: MGU im. M. V. Lomonosova, 2006:203. (In Russ.)

4. Martin R. *Chistaya arkhitektura. Iskustvo razrabotki programmnogo obespecheniya = Clean architecture. The art of software engineering*. Saint-Petersburg: Piter, 2018:352. (In Russ.)
5. Il'in V.V. *Modelirovanie biznes-protsessov. Prakticheskoe ispol'zovanie ARIS = Business process modeling. Practical use of ARIS*. Moscow: Dialektika-Vil'yams, 2006:176. (In Russ.)
6. Goetsch K. *Microservices for Modern Commerce: Report*. CA: O'Reilly Media, 2017:25–47.
7. *Problematika raspredelennykh tranzaktsiy v kontekste mikroservisnoy arkhitektury = Issues of distributed transactions in the context of a microservice architecture*. Available at: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/516720/> (accessed 08.03.2021). (In Russ.)
8. Nadareishvili I., Mitra R., McLarty M., Amundsen M. *Microservice architecture*. CA: O'Reilly Media, 2016:25–38.
9. *Committing a Transaction in Single-Phase and Multi-Phase*. Available at: <https://docs.microsoft.com/ru-ru/dotnet/framework/data/transactions/committing-a-transaction-in-single-phase-and-multi-phase> (accessed 07.03.2021).
10. *Saga distributed transactions*. Available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/architecture/reference-architectures/saga/saga> (accessed 08.03.2021).
11. *Saga pattern and distributed transactions*. Available at: <https://bool.dev/blog/detail/saga-pattern-i-raspredelennye-tranzaktsii> (accessed 08.03.2021).
12. *Applying the saga pattern*. Available at: <https://medium.com/@evgenzt/%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%BF%D0%B0%D1%82%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%81%D0%B0%D0%B3%D0%B0-7eead841d90f> (accessed 08.03.2021).
13. *Sagas*. Available at: <https://microservices.io/patterns/data/saga.html> (accessed 08.03.2021).
14. *Pattern: Saga*. Available at: <https://itnan.ru/post.php?c=1&p=427705> (accessed 09.03.2021).
15. *Pattern: Saga*. Available at: <https://habr.com/ru/company/otus/blog/519636/> (accessed 09.03.2021).

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Сергеевич Фомин

аспирант, Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет
имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: nkfominsa@gmail.com

Dmitriy S. Fomin

Postgraduate student, Ogarev Mordovia
State University (68 Bolshevistskaya
street, Saransk, Russia)

Александр Витальевич Бальзамов

аспирант, Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет
имени Н. П. Огарева (Россия, г. Саранск,
ул. Большевикская, 68)

E-mail: veron13rus@yandex.ru

Aleksandr V. Bal'zamor

Postgraduate student, Ogarev Mordovia
State University (68 Bolshevistskaya
street, Saransk, Russia)

Поступила в редакцию / Received 22.03.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 13.04.2021

Принята к публикации / Accepted 21.05.2021

УДК 004.934

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-3

Способ повышения эффективности сегментации речь/пауза на основе метода декомпозиции на эмпирические моды

А. К. Алимуратов¹, А. Ю. Тычков², П. П. Чураков³,
А. В. Агейкин⁴, А. В. Кузьмин⁵, М. А. Митрохин⁶, И. А. Чернов⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹alansapfir@yandex.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³churakov-pp@mail.ru,

⁴ageykinav@yandex.ru, ⁵a.v.kuzmin@pnzgu.ru, ⁶mmax83@mail.ru,

⁷igorchernov999@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Сегментация речь/пауза является одной из важнейших задач обработки в речевых приложениях и представляет собой точное обнаружение границ начала и окончания вокализованной, невокализованной речи и пауз. Особенно это важно при анализе скорости, ускорения и энтропии распределения вокализованных, невокализованных участков речи и пауз, а также при анализе средней продолжительности пауз. Целью работы является повышение эффективности сегментации речь/пауза на основе метода декомпозиции на эмпирические моды. *Материалы и методы.* В работе использовалась уникальная технология адаптивного разложения нестационарных сигналов – улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом. Программная реализация способа была выполнена в среде математического моделирования © Matlab (MathWorks). *Результаты.* Разработан способ, основанный на применении декомпозиции на этапе предварительной обработки исходных речевых сигналов для формирования набора новых исследуемых сигналов, содержащих максимально достоверную информацию о границах начала и окончания участков вокализованной, невокализованной речи и пауз. Проведено исследование, в рамках которого оценивалось влияние метода декомпозиции и длительности исследуемых фрагментов сигналов на эффективность сегментации речь/пауза. Для сегментации использовались способы, основанные на анализе количества пересечения сигнала через нулевую ось, кратковременной энергии, а также на основе анализа одномерного расстояния Махаланобиса. *Выводы.* В соответствии с результатами исследований выявлено, что предложенный способ обеспечивает повышение эффективности сегментации участков вокализованной и невокализованной речи: для способа на основе анализа количества пересечения сигнала через нулевую ось – на 13,96 %; для способа на основе анализа кратковременной энергии – на 8,24 %; для способа на основе совместного анализа количества пересечения и кратковременной энергии – на 5,72 %; для способа на основе анализа одномерного расстояния Махаланобиса – на 17,85 %.

Ключевые слова: обработка речевых сигналов, сегментация речи, вокализованная и невокализованная речь, декомпозиция на эмпирические моды

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ, проект № МК-490.2020.8.

Для цитирования: Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Агейкин А. В., Кузьмин А. В., Митрохин М. А., Чернов И. А. Способ повышения эффективности сегментации речь/пауза на основе метода декомпозиции на эмпирические моды // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 24–43. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-3

© Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Агейкин А. В., Кузьмин А. В., Митрохин М. А., Чернов И. А., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

EMD-based method to improve the efficiency of speech/pause segmentation

A.K. Alimuradov¹, A.Yu. Tychkov², P.P. Churakov³,
A.V. Ageykin⁴, A.V. Kuz'min⁵, M.A. Mitrokhin⁶, I.A. Chernov⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Penza State University, Penza, Russia

¹alansapfir@yandex.ru, ²tychkov-a@mail.ru, ³churakov-pp@mail.ru,

⁴ageykinav@yandex.ru, ⁵a.v.kuzmin@pnzgu.ru, ⁶mmax83@mail.ru,

⁷igorchernov999@mail.ru

Abstract. *Background.* Speech/pause segmentation is one of the most important tasks in speech applications being accurate detection of the boundaries of the beginning and the end of voiced and unvoiced speech, and pauses. This is especially important both when analyzing distribution speed, acceleration, and entropy of voiced and unvoiced speech sections, and pauses, and analyzing the average duration of pauses. The aim of the work is to improve the efficiency of speech/pause segmentation based on the method of empirical mode decomposition. *Materials and methods.* A unique technology for adaptive decomposition of non-stationary signals, namely, the improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, has been used in the work. The software implementation of the method was performed in ©MATLAB (MathWorks) mathematical modeling environment. *Results.* A decomposition-based method has been developed to be used at the preprocessing stage of the original speech signals to form a set of new investigated signals containing the most reliable information about the boundaries of the beginning and the end of the voiced and unvoiced speech, and pauses. The research to assess the influence of the decomposition method, and the duration of the studied signal fragments on the efficiency of speech/pause segmentation has been done. We have used the methods based on the analysis of zero-crossing rate, short-term energy, and one-dimensional Mahalanobis distance. *Conclusions.* Based on the research results, it was found that the proposed method provides an increase in the efficiency of segmentation of voiced and unvoiced speech sections: by 13.96% for the method based on the analysis of zero-crossing rate; by 8.24% for the method based on the analysis of short-term energy; by 5.72% for the method based on the combined analysis of zero-crossing rate and short-term energy; by 17.85% for the method based on the analysis of one-dimensional Mahalanobis distance.

Keywords: speech signal processing, speech segmentation, voiced and unvoiced speech, empirical mode decomposition

Acknowledgments: the research was financed by the Council for Grants of the President of the Russian Federation, project No. MK-490.2020.8

For citation: Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Ageykin A.V., Kuz'min A.V., Mitrokhin M.A., Chernov I.A. EMD-method to improve the efficiency of speech/pause segmentation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;2:24–43. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-3

Введение

Точное обнаружение границ начала и окончания информативных участков речевых сигналов является одной из важнейших задач в речевых приложениях. В соответствии с физиологией речевого аппарата речь человека содержит три вида информативных участков: пауза, или тишина; невокализованная речь (апериодическая речь случайного характера); вокализованная речь (квазипериодическая речь). Задача сегментации речь/пауза пред-

ставляет собой классификацию информативных участков на вокализованную, невокализованную речь и паузы.

В зависимости от назначения речевых приложений информативные участки речи имеют разную значимость для дальнейшей обработки. В приложениях распознавания речи, голосового управления и преобразования речи в текст паузы в анализируемых речевых сигналах являются неинформативными и удаляются на этапе предварительной обработки. Объясняется это тем, что основной набор информативных параметров дикторов (амплитудно-частотных, спектрально-временных, кепстральных и др.) сосредоточен в вокализованной и невокализованной речи. В приложениях, предназначенных для выявления патологии голоса человека, нарушений моторики речевого аппарата или оценки психоэмоционального состояния паузы в речевых сигналах, максимально информативны. Например: при анализе скорости, ускорения и энтропии распределения вокализованных, невокализованных участков и пауз, а также при анализе средней продолжительности пауз в речи.

На сегодня задача сегментации речь/пауза решается разными способами, которые можно разделить на частотные и временные. Частотные способы основаны на анализе мел-частотных кепстральных коэффициентов (Mel-Frequency Cepstral Coefficients, MFCC) [1] и линейно-частотных кепстральных коэффициентов (Linear-Frequency Cepstral Coefficients, LFCC) [2]. Временные способы основаны на анализе количества пересечения сигнала через нулевую ось (Zero-Crossing Rate, ZCR) [3], отклонения автокорреляционной функции (Autocorrelation Function, ACR) [4], кратковременной энергии (Short Time Energy, STE) [5], а также одномерного расстояния Махаланобиса (One Dimensional Mahalanobis Distance, ODMD) [6].

В данной статье представлен способ повышения эффективности сегментации речь/пауза на основе метода декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ). ДЭМ применяется на этапе предварительной обработки исходного речевого сигнала для формирования набора новых исследуемых сигналов, содержащих максимально достоверную информацию о границах начала и окончания участков вокализованной, невокализованной речи и пауз.

Данная статья является результатом научной работы, посвященной исследованию и разработке эффективных алгоритмов и способов обработки речевых сигналов [7–9].

1. Декомпозиция на эмпирические моды

ДЭМ представляет собой адаптивный метод разложения нестационарных данных [10], основным преимуществом которого является полная адаптивность. Базисные функции, используемые для разложения, извлекаются непосредственно из исследуемого сигнала и позволяют учитывать только ему свойственные особенности. В рамках декомпозиции многократно осуществляется процесс просеивания, в результате которого исследуемый сигнал раскладывается на эмпирические моды (ЭМ) и конечный неделимый остаток. Процесс просеивания включает в себя обязательное решение следующих задач:

Задача 1. Определение среднего значения верхней и нижней огибающих исследуемого сигнала.

Задача 2. Вычитание среднего значения верхней и нижней огибающих из исследуемого сигнала.

Задача 3. Многократное повторение первой и второй задачи до тех пор, пока среднее значение не будет близко к нулю.

Задача 4. Выделение сигнала первой ЭМ, у которого среднее значение верхней и нижней огибающих максимально приблизилось к нулю в соответствии с критерием останова.

Задача 5. Вычитание первой ЭМ из исследуемого сигнала.

Задача 6. Повторение с первой по пятую задачи до тех пор, пока не будет получен монотонный сигнал (конечный неделимый остаток), из которого невозможно извлечь ни одну ЭМ.

Аналитическое выражение ДЭМ выглядит следующим образом:

$$x(n) = \sum_{i=1}^I IMF_i(n) + r_I(n), \quad (1)$$

где $x(n)$ – исследуемый сигнал; n – дискретный отсчет времени; $IMF_i(n)$ – сигнал ЭМ; i – номер ЭМ; I – количество ЭМ; $r_I(n)$ – конечный неделимый остаток.

Метод ДЭМ впервые был представлен в 1998 г. [10]. На сегодня известны различные методы декомпозиций: множественная ДЭМ – МДЭМ (2009) [11], комплементарная МДЭМ – КМДЭМ (2010) [12], полная МДЭМ с адаптивным шумом – ПМДЭМАШ (2011) [13] и улучшенная ПМДЭМАШ (2014) [14]. Наиболее адаптивным методом декомпозиции для обработки речи является метод улучшенной ПМДЭМАШ. Особенность улучшенной декомпозиции заключается в добавлении к исследуемому сигналу контролируемого белого шума малой амплитуды для создания новых нулей и экстремумов (локальных особенностей) функции сигнала. Создание новых локальных особенностей позволяет устранить известные недостатки предыдущих методов декомпозиции: эффект смешивания ЭМ; остаточный шум; неполное разложение; неинформативные «паразитные» ЭМ, выделяемые на ранних этапах декомпозиции.

Математический аппарат методов декомпозиции с добавлением шума выглядит следующим образом:

$$x_j(n) = x(n) + w_j(n), \quad (2)$$

где $x_j(n)$ – зашумленный речевой сигнал белым шумом; $w_j(n)$ – белый шум; $j = 1, 2, \dots, J$ – реализации белого шума;

$$x_j(n) = \sum_{i=1}^I IMF_{j,i}(n) + r_{j,I}(n), \quad (3)$$

$$IMF_i(n) = \sum_{j=1}^J \frac{IMF_{j,i}(n)}{J}, \quad (4)$$

$$r_I(n) = \sum_{j=1}^J \frac{r_{j,I}(n)}{J}. \quad (5)$$

2. Способы сегментации речь/пауза

Как отмечалось ранее, способы на основе анализа ZCR , STE , а также на основе совместного анализа ZCR и STE являются самыми распространенными в задачах сегментации речи на информативные участки. Однако в упомянутых способах до сих пор существует основная проблема, ограничивающая их массовое применение в речевых приложениях. Ограничения связаны с выбором корректных пороговых значений, соответствующих вокализованной, невокализованной речи и паузам. Ниже представлены аналитические выражения, используемые для вычисления значений ZCR и STE .

Функция ZCR основана на сравнении знаков соседних дискретных отсчетов времени и определяется по следующей формуле:

$$ZCR_s = 0,5 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left| \operatorname{sgn}(x(n)) - \operatorname{sgn}(x(n-1)) \right| w(s-n), \quad (6)$$

где s – номер фрагмента; $\operatorname{sgn}(x)$ – знаковая функция ($\operatorname{sgn}(x) = 1$ при $x \geq 0$ и $\operatorname{sgn}(x) = -1$ при $x \leq 0$); w – функция анализируемого окна.

Для прямоугольного анализируемого окна формула (6) принимает следующий вид:

$$ZCR_s = 0,5 \sum_{n=1}^{N-1} \left| \operatorname{sgn}(x(s-1)N+n+1) - \operatorname{sgn}(x(s-1)N+n) \right|, \quad (7)$$

где N – количество дискретных отсчетов в исследуемом фрагменте.

Функция STE представляет собой сумму квадратов амплитуд дискретных отсчетов времени и определяется по следующей формуле:

$$E_s = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[x(n)w(s-n) \right]^2. \quad (8)$$

Для прямоугольного анализируемого окна формула (8) принимает следующий вид:

$$E_s = \sum_{n=1}^N \left[x(s-1)N+n \right]^2. \quad (9)$$

Способ сегментации речь/пауза на основе анализа ZCR построен на предположении, что количество пересечений функции сигнала через нулевую ось для пауз с фоновым шумом больше по сравнению с вокализованной, невокализованной речью. Аналогично построен способ на основе анализа STE – кратковременная энергия вокализованной, невокализованной речи больше, чем энергия пауз с фоновым шумом. Однако данные предположения не совсем корректные, так как остается нерешенным вопрос – насколько текущие значения ZCR и STE должны быть больше, чем пороговые для корректной сегментации информативных участков. Кроме того, известно, что пороговые значения могут варьировать для каждого конкретного анализируемого речевого сигнала. В работе [15] авторами была предпринята попытка выбрать и обосновать пороговые значения ZCR и STE , соответствующие вокализован-

ной, невокализированной речи и паузам. В соответствии с выводами в работе [15] точность составила 65 % в сравнении с сегментацией, осуществленной вручную.

Способ сегментации речь/пауза на основе анализа *ODMD* построен на статистических свойствах фонового шума и физиологии речевого аппарата человека [6]. В соответствии с физиологией воспроизведения речи человек перед произношением выдерживает вынужденную начальную паузу, длительностью не менее 200 мс, которая соответствует фоновому шуму. Предполагается, что фоновый шум, регистрируемый во время начальной паузы, имеет Гауссовский характер, а остальные информативные участки вокализированной и невокализированной речи имеют другое распределение. В этом случае функция плотности вероятности распределения фонового шума является критерием для сегментации речь/пауза. Таким образом, решается основная проблема – выбор корректных пороговых значений.

В основе вычисления *ODMD* лежит функция плотности вероятности нормального распределения:

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y-\mu}{\sigma}\right)^2}, \quad (10)$$

где μ и σ – математическое ожидание и стандартное отклонение независимых случайных величин y .

Как известно, кривая функции плотности вероятности нормального распределения имеет форму симметричного колоколообразного импульса. Независимые случайные величины имеют тенденцию группироваться около среднего значения. Пик нормального распределения соответствует $y = \mu$, а ширина пропорциональна стандартным отклонениям σ . Аналитическое выражение *ODMD* имеет следующий вид:

$$r = \frac{|y - \mu|}{\sigma}, \quad (11)$$

где выражение $|y - \mu|$ является естественной мерой расстояния от y к среднему значению μ (численно вероятности подчиняются следующим выражениям:

$$|y - \mu| \leq \sigma = 0,68, \quad |y - \mu| \leq 2\sigma = 0,95 \quad \text{и} \quad |y - \mu| \leq 3\sigma = 0,997.$$

В работе [16] представлен подробный сравнительный анализ результатов сегментации речь/пауза, полученных с помощью способов на основе анализа *ZCR*, *STE* и *ODMD*. В соответствии с выводами в работе [16] способ на основе анализа *ODMD* эффективнее для отдельных словосочетаний, чем способы на основе анализа *ZCR* и совместного анализа *ZCR* и *STE* на 5,6 и 13,18 % соответственно, для слитной речи – на 8,88 и 9,59 % соответственно.

3. Способ повышения эффективности сегментации речь/пауза

Способ повышения эффективности сегментации речь/пауза основан на применении ДЭМ на этапе предварительной обработки исходного речевого

сигнала. Результатом предварительной обработки является набор новых исследуемых сигналов, содержащих максимально достоверную информацию о границах начала и окончания участков вокализованной, невокализованной речи и пауз.

На рис. 1 представлена структура алгоритма предлагаемого способа. Блоки зеленого цвета представляют собой предварительную обработку на основе ДЭМ. Блоки фиолетового, красного и голубого цветов представляют способы сегментации на основе анализа *ODMD* и *ZCR*, *STE*. Блоки серого цвета не относятся к предлагаемому способу и предназначены для постобработки ошибок сегментации речь/пауза и сравнения результатов с сегментацией, осуществленной вручную.

Предварительная обработка на основе ДЭМ

Фрагментирование представляет собой линейное разделение речевого сигнала на отрезки (фрагменты) равной длительности. Фрагментирование основано на кратковременном анализе, в рамках которого фрагменты обрабатываются так, как если бы они были короткими речевыми сигналами с отличающимися свойствами. В соответствии с предлагаемым способом от длительности исследуемых фрагментов зависит результат последующей декомпозиции.

В работе [17] авторами представлены результаты исследований влияния длительности анализируемых речевых сигналов на частотно-избирательные свойства различных методов декомпозиции. В соответствии с полученными результатами в работе [17] сделан вывод, что для корректного частотно-временного анализа длительность исследуемых фрагментов должна быть от 10 до 50 мс.

Фрагментирование речевого сигнала осуществляется по следующим формулам:

$$S = \frac{x(n)}{L}, \quad (12)$$

где S – количество фрагментов в исследуемом речевом сигнале $x(n)$ (с округлением в меньшую сторону); L – количество дискретных отсчетов времени в одном фрагменте;

$$x_{s+1}(n) = x[(s \cdot L) + 1 : (s + 1) \cdot L]. \quad (13)$$

В предлагаемом способе повышения эффективности сегментации речь/пауза применяются следующие методы декомпозиции: ДЭМ, МДЭМ и улучшенная ПМДЭМАШ. Использование двух методов декомпозиции с добавлением шума объясняется тем, что МДЭМ и КМДЭМ, а также ПМДЭМАШ и улучшенная ПМДЭМАШ аналогичны с точки зрения просеивания ЭМ. Отличительной особенностью улучшенной ПМДЭМАШ от других методов декомпозиции с добавлением шума является локальное разложение белого шума на шумовые моды параллельно с разложением исследуемого сигнала. Использование шумовых мод в качестве добавляемого контролируемого белого шума на каждом этапе процесса просеивания обеспечивает полноту разложения [14].

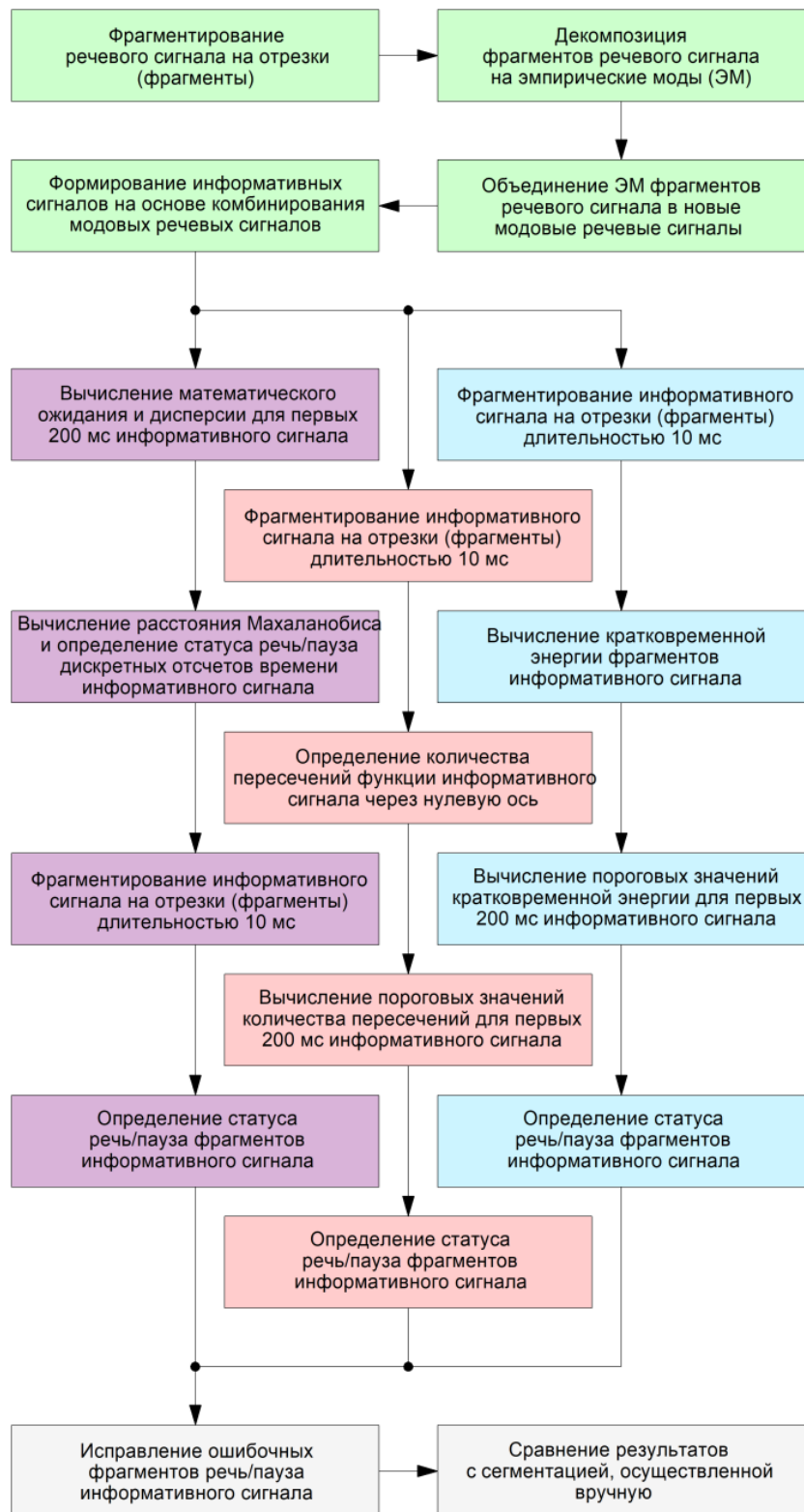


Рис. 1. Структурная схема способа повышения эффективности сегментации речь/пауза на основе метода ДЭМ

Для методов декомпозиции с добавлением шума применяются следующие настройки: стандартное отклонение амплитуды шума от амплитуды исследуемого сигнала – не более 20 %; количество реализаций белого шума – 100; допустимое максимальное количество просеивающих итераций – 50; отношение стандартных отклонений сигнала и шума на всех этапах процесса просеивания ЭМ неизменное (для метода улучшенной ПМДЭМАШ).

В соответствии с результатом декомпозиции каждый фрагмент исходного речевого сигнала представлен набором ЭМ. Для оптимизации вычислительных затрат предлагаемого способа осуществляется объединение ЭМ фрагментов исходного речевого сигнала в новые модовые речевые сигналы:

$$xmode_i(n) = \sum_{s=1}^S IMF_{s,i}[(s \cdot L) + 1 : (s + 1) \cdot L], \quad (14)$$

где $xmode_i(n)$ – модовый речевой сигнал; $i = 1, 2, \dots, I$ – количество ЭМ в наборах для каждого фрагмента s .

Количество сформированных модовых речевых сигналов зависит от количества ЭМ, полученных для каждого фрагмента.

Формирование информативных сигналов на основе комбинирования четырех модовых речевых сигналов осуществляется по следующей формуле:

$$xinfo(n) = a \cdot x(n) + b \cdot xmode_1(n) + c \cdot xmode_2(n) + d \cdot xmode_3(n) + e \cdot xmode_4(n), \quad (15)$$

где a, b, c, d, e – коэффициенты, определяющие участие исходного и модовых речевых сигналов в формировании информативных сигналов (коэффициенты принимают только три значения: $-1, 0, 1$).

Суть формирования информативных сигналов заключается в поиске уникального сигнала, содержащего максимально достоверную информацию о границах начала и окончания участков вокализованной, невокализованной речи и пауз. В соответствии с ранее проведенными исследованиями [18] в табл. 1 представлены оптимальные информативные сигналы.

Таблица 1
Оптимальные информативные сигналы

Информативный сигнал	Значение коэффициентов	Комбинирование модовых речевых сигналов
1	2	3
$xinfo_1$	$a = 0, b = 1, c = 1, d = 0, e = 0$	$xmode_1 + xmode_2$
$xinfo_2$	$a = 0, b = 1, c = 1, d = 1, e = 0$	$xmode_1 + xmode_2 + xmode_3$
$xinfo_3$	$a = 0, b = 1, c = 1, d = 1, e = 1$	$xmode_1 + xmode_2 + xmode_3 + xmode_4$
$xinfo_4$	$a = 0, b = 0, c = 1, d = 1, e = 0$	$xmode_2 + xmode_3$
$xinfo_5$	$a = 0, b = 0, c = 1, d = 1, e = 1$	$xmode_2 + xmode_3 + xmode_4$
$xinfo_6$	$a = 0, b = 0, c = 1, d = 0, e = 1$	$xmode_2 + xmode_4$
$xinfo_7$	$a = 0, b = 1, c = 0, d = 1, e = 1$	$xmode_1 + xmode_3 + xmode_4$
$xinfo_8$	$a = 0, b = 1, c = 1, d = 0, e = 1$	$xmode_1 + xmode_2 + xmode_4$
$xinfo_9$	$a = 1, b = -1, c = 0, d = 0, e = 0$	$x - xmode_1$
$xinfo_{10}$	$a = 1, b = 0, c = -1, d = 0, e = 0$	$x - xmode_2$

Окончание табл. 1

1	2	3
$xinfo_{11}$	$a = 1, b = 0, c = 0, d = -1, e = 0$	$x - xmode_3$
$xinfo_{12}$	$a = 1, b = 0, c = 0, d = 0, e = -1$	$x - xmode_4$
$xinfo_{13}$	$a = 1, b = -1, c = -1, d = 0, e = 0$	$x - xmode_1 - xmode_2$
$xinfo_{14}$	$a = 1, b = 0, c = -1, d = -1, e = -1$	$x - xmode_2 - xmode_3 - xmode_4$
$xinfo_{15}$	$a = 1, b = 0, c = 0, d = -1, e = -1$	$x - xmode_3 - xmode_4$
$xinfo_{16}$	$a = 1, b = 0, c = -1, d = 0, e = -1$	$x - xmode_2 - xmode_4$
$xinfo_{17}$	$a = 1, b = 0, c = -1, d = -1, e = 0$	$x - xmode_1 - xmode_3$
$xinfo_{18}$	$a = 1, b = -1, c = 0, d = 0, e = -1$	$x - xmode_1 - xmode_4$

Сегментация на основе анализа ODMD

В соответствии с методикой [6] осуществляется вычисление математического ожидания и дисперсии для начальных 200 мс, соответствующих вынужденной паузе (фоновому шуму). При частоте дискретизации 8000 Гц начальная пауза составляет 1600 дискретных отсчетов:

$$\mu = \frac{1}{1600} \sum_{n=1}^{1600} xinfo_i(n), \quad (16)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{1600} \sum_{n=1}^{1600} (xinfo_i(n) - \mu)^2}, \quad (17)$$

где $xinfo_i(n)$ – информативный сигнал.

Определение статуса речь/пауза дискретных отсчетов времени информативного сигнала заключается в вычислении и анализе значений ODMD:

$$\frac{|xinfo_i(n) - \mu|}{\sigma} \geq 3, \quad (18)$$

где $n = 1, 2, \dots, N$ – номер дискретного отсчета времени.

При выполнении условия дискретный отсчет времени соответствует речи, и наоборот, если условие не выполняется, то отсчет соответствует паузе.

Фрагментирование информативного сигнала осуществляется аналогично, как и фрагментирование исходного речевого сигнала по формулам (12) и (13). Длительность анализируемого фрагмента 10 мс подобрана в соответствии с минимальной длительностью смысловой речевой единицы – фонемы.

Определение статуса речь/пауза фрагментов информативного сигнала заключается в проверке следующего условия: количество дискретных отсчетов в анализируемом фрагменте, соответствующих речи или паузе, должно быть больше или равно половине общего числа отсчетов во фрагменте. То есть не менее 40 дискретных отсчетов времени при длительности фрагмента 10 мс и частоте дискретизации 8000 Гц.

Сегментация на основе анализа ZCR и STE

Фрагментирование информативного сигнала осуществляется по формулам (12) и (13). Вычисление значений ZCR и STE фрагментов информативного сигнала осуществляется по формулам (7) и (9) соответственно.

Для корректного анализа в предлагаемом способе представлено решение проблемы выбора пороговых значений ZCR и STE . По аналогии со способом сегментации на основе анализа $ODMD$ для формирования пороговых значений ZCR и STE используется начальная пауза. В соответствии с формулами (16) и (17) вычисляются математические ожидания и дисперсии значений ZCR и STE для начальных фрагментов, соответствующих начальной паузе 200 мс (фоновому шуму):

$$\mu_{ZCR} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S ZCRxinfo_s, \quad (19)$$

$$\sigma_{ZCR} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (ZCRxinfo_s - \mu_{ZCR})^2}, \quad (20)$$

$$\mu_E = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S Exinfo_s, \quad (21)$$

$$\sigma_E = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (Exinfo_s - \mu_E)^2}, \quad (22)$$

где $ZCRxinfo_s$, $Exinfo_s$ – значения ZCR и STE исследуемого фрагмента информативного сигнала.

Определение статуса речь/пауза фрагментов информативного сигнала заключается в проверке следующих условий:

$$|ZCRxinfo_s - \mu_{ZCR}| \geq \sigma_{ZCR}, \quad (23)$$

$$|Exinfo_s - \mu_E| \geq \sigma_E. \quad (24)$$

Если разница между текущим и средним значениями ZCR больше или равна стандартному отклонению, то фрагмент соответствует паузе. И наоборот, если условие не выполняется, то фрагмент соответствует речи. Аналогично: если разница между текущим и средним значениями STE больше или равна стандартному отклонению, то фрагмент соответствует речи. И наоборот, если условие не выполняется, то фрагмент соответствует паузе.

Сегментация на основе совместного анализа ZCR и STE осуществляется аналогично анализу значений ZCR , STE по отдельности с учетом сопоставления результатов.

Постобработка и сравнение результатов сегментации

В соответствии с физиологией речевого аппарата человек не может кратковременно (в течение 20 мс) изменить воспроизводимую речь на паузу и наоборот [4]. Данный физиологический аспект заложен в основу исправления ошибок сегментации – поиске некорректно определенных фрагментов речь/пауза. На рис. 2 представлен пример, иллюстрирующий ошибки сегментации речь/пауза.

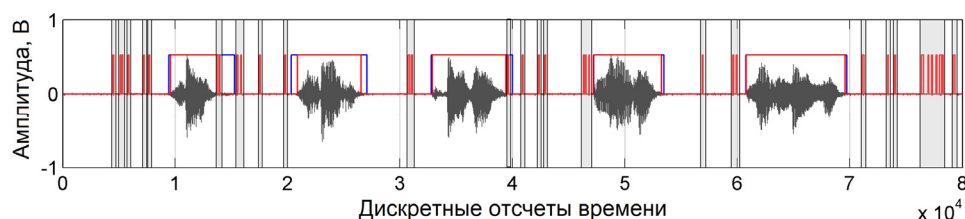


Рис. 2. Ошибки сегментации речь/пауза (линией красного цвета обозначен результат сегментации, линией синего цвета – результат сегментации, осуществленной вручную, фоном серого цвета обозначены некорректно определенные фрагменты)

Сегментация речевых сигналов на информативные участки вручную осуществлялась специалистами с помощью многоплатформенного аудиоредактора звуковых файлов Audacity, производитель Audacity Team (audacityteam.org).

4. Исследование способа повышения эффективности

Для оценки эффективности сегментации речь/пауза была сформирована база, состоящая из 600 речевых сигналов. Запись сигналов осуществлялась посредством специально разработанной методики, в рамках которой дикторы зачитывали следующий текстовый материал:

- статья из рекламно-информационной газеты, включающая публицистический текст на русском языке (не менее 200 слов);
- краткое детское литературное произведение, включающее фонетически сбалансированный текст на русском языке (не менее 200 слов);
- счет чисел от 0 до 99 на русском языке (100 слов).

Запись осуществлялась в обычном лабораторном помещении с естественным фоновым шумом. Произношение диктором – размеренное. Количество дикторов – 20 человек из числа мужчин и женщин. Параметры и пространственные характеристики микрофона не изменялись для всех регистрируемых дикторов.

Эффективность сегментации речь/пауза оценивалась посредством определения ошибок первого (α) и второго (β) рода. Основной задачей сегментации является точное обнаружение границ начала и окончания вокализованной и невокализованной речи, поэтому ошибкой первого рода считалось ошибочное присваивание речевому фрагменту статуса «пауза». Ошибкой второго рода считалось ошибочное присваивание фрагменту паузы статуса «речь». Ошибки первого и второго рода определялись в сравнении с результатом сегментации, осуществленной вручную.

В рамках исследования оценивалось влияние метода декомпозиции (ДЭМ, МДЭМ и улучшенная ПМДЭМАШ) и длительности (10, 30 и 50 мс) исследуемого фрагментов на эффективность сегментации речь/пауза способов, основанных на анализе *ZCR*, *STE*, совместном анализе *ZCR* и *STE*, а также анализе *ODMD*.

Программная реализация способа повышения эффективности сегментации речь/пауза выполнена в среде математического моделирования ©Matlab, производитель MathWorks (www.mathworks.com). Программная реализация метода улучшенной ПМДЭМАШ была заимствована из работы [19].

В табл. 2 представлены усредненные данные ошибок первого и второго рода, полученные по результатам сегментации с помощью упомянутых выше способов.

Таблица 2

Усредненные данные ошибок первого и второго рода, полученные по результатам сегментации способами на основе анализа *ZCR*, *STE*, совместного анализа *ZCR* и *STE*, а также анализа *ODMD*

Способ сегментации речь/пауза	Ошибки первого и второго рода, %	
	α	β
Способ на основе анализа <i>ZCR</i>	23,11	3,02
Способ на основе анализа <i>STE</i>	10,53	3,2
Способ на основе совместного анализа <i>ZCR</i> и <i>STE</i>	7,32	5,33
Способ на основе анализа <i>ODMD</i>	21,97	0,89

В табл. 3 представлены усредненные данные наименьших среднеарифметических значений ошибок первого и второго рода, полученных с помощью предлагаемого способа и соответствующих наилучшему результату сегментации речь/пауза. Данные в табл. 3 представлены в соответствии с результатами исследования трех модовых речевых сигналов и 18 информативных сигналов. Для каждого исследуемого сигнала данные ошибок первого и второго рода представлены при разных значениях длительности фрагментов 10, 30 и 50 мс.

Таблица 3

Усредненные данные наименьших среднеарифметических значений ошибок первого и второго рода, соответствующих наилучшему результату сегментации речь/пауза

Способ сегментации речь/пауза	Длительность исследуемых фрагментов, мс	Среднеарифметическое значение ошибок первого и второго рода, %		
		ДЭМ	МДЭМ	Улучшенная ПМДЭМАШ
Способ на основе анализа <i>ZCR</i>	10	8,04	8,59	8,71
	30	8,08	9,17	8,34
	50	8,07	8,45	8,48
Способ на основе анализа <i>STE</i>	10	3,05	3,89	4,66
	30	4,74	2,8	4,22
	50	3,43	2,03	2,35
Способ на основе совместного анализа <i>ZCR</i> и <i>STE</i>	10	4,38	5,84	5,62
	30	5,12	4,05	3,69
	50	3,57	2,31	2,62
Способ на основе анализа <i>ODMD</i>	10	2,91	2,66	3,0
	30	2,5	2,5	2,73
	50	2,96	2,73	2,73

Наилучший результат сегментации речь/пауза способом на основе анализа *ZCR* со среднеарифметическим значением ошибок первого и второго рода 8,04 % достигается при исследовании информативного сигнала 6. Ин-

формативный сигнал 6 представляет собой сумму второго и четвертого модовых речевых сигналов. Среднеарифметическое значение 8,04 % соответствует оптимальным значениям 9,15 и 6,93 % ошибок первого и второго рода соответственно. Исследование осуществлялось методом ДЭМ с длительностью фрагментов 10 мс.

Наилучший результат сегментации речь/пауза способом на основе анализа *STE* со среднеарифметическим значением ошибок первого и второго рода 2,03 % достигается при исследовании информативного сигнала 3. Информативный сигнал 3 представляет собой сумму всех четырех модовых речевых сигналов. Среднеарифметическое значение 2,03 % соответствует оптимальным значениям 2,29 и 1,78 % ошибок первого и второго рода соответственно. Исследование осуществлялось методом МДЭМ с длительностью фрагментов 50 мс.

Наилучший результат сегментации речь/пауза способом на основе совместного анализа *ZCR* и *STE* со среднеарифметическим значением ошибок первого и второго рода 2,31 % достигается при исследовании информативного сигнала 3. Среднеарифметическое значение 2,31 % соответствует оптимальным значениям 1,6 и 3,02 % ошибок первого и второго рода соответственно. Исследование осуществлялось методом МДЭМ с длительностью фрагментов 50 мс.

Наилучший результат сегментации речь/пауза способом на основе анализа *ODMD* со среднеарифметическим значением ошибок первого и второго рода 2,5 % достигается при исследовании информативного сигнала 2. Информативный сигнал 2 представляет собой сумму первых трех модовых речевых сигналов. Среднеарифметическое значение 2,5 % соответствует оптимальным значениям 4,12 и 0,89 % ошибок первого и второго рода соответственно. Исследование осуществлялось методом МДЭМ с длительностью фрагментов 30 мс.

В табл. 4 представлены исходные и достигнутые усредненные данные ошибок первого и второго рода, полученные по результатам сегментации речь/пауза с помощью способов на основе анализа *ZCR*, *STE*, совместного анализа *ZCR* и *STE*, а также анализа *ODMD*.

Таблица 4

Исходные и достигнутые усредненные данные ошибок первого и второго рода, полученные по результатам сегментации речь/пауза способами на основе анализа *ZCR*, *STE*, совместного анализа *ZCR* и *STE*, а также анализа *ODMD*

Способ сегментации речь/пауза	Ошибки первого и второго рода, %			
	Исходные данные		Достигнутые данные	
	α	β	α	β
Способ на основе анализа <i>ZCR</i>	23,11	3,02	9,15	6,93
Способ на основе анализа <i>STE</i>	10,53	3,2	2,29	1,78
Способ на основе совместного анализа <i>ZCR</i> и <i>STE</i>	7,32	5,33	1,6	3,02
Способ на основе анализа <i>ODMD</i>	21,97	0,89	4,12	0,89

На рис. 3 представлен пример, иллюстрирующий исходные и достигнутые результаты сегментации речь/пауза сигнала длительностью 10 с, представляющего собой сочетание следующих слов на русском языке: шанс, шар,

баян, Лара, нормально. Слова подобраны таким образом, чтобы в них содержались разные по способу образования звуки: гласные, сонорные, шумные смычные (взрывные, фрикативные) и шумные щелевые.

Заключение

Подводя итоги анализа результатов исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Сравнительный анализ исходных и достигнутых результатов демонстрирует повышение эффективности сегментации участков вокализованной и невокализованной речи за счет применения методов ДЭМ на этапе предварительной обработки (рис. 3).

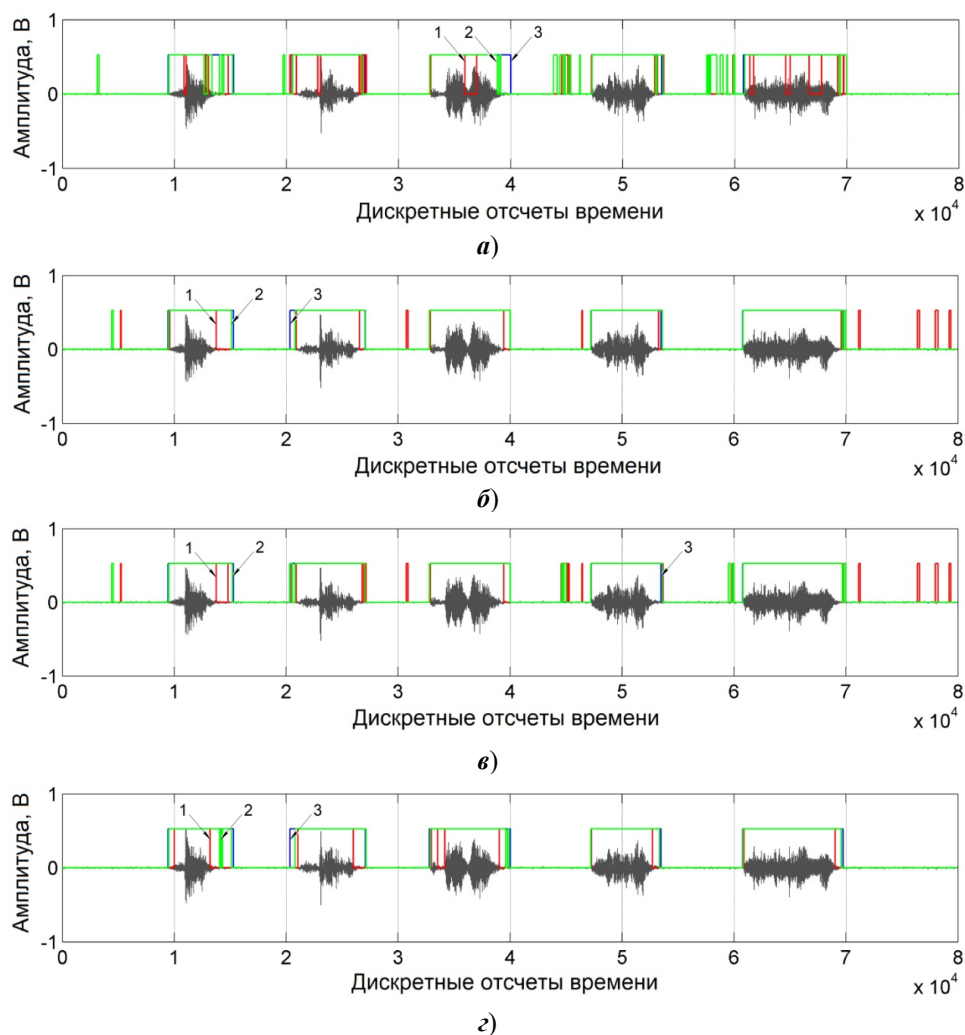


Рис. 3. Пример, иллюстрирующий исходные и достигнутые результаты сегментации речь/пауза (линией 1 обозначены исходные результаты сегментации, линией 2 – достигнутые результаты сегментации, линией 3 – результат сегментации, осуществленной вручную): а – способ на основе анализа ZCR; б – способ на основе анализа STE; в – способ на основе совместного анализа ZCR и STE; г – способ на основе анализа ODMD

Эффективность сегментации (см. рис. 3):

- для способа на основе анализа *ZCR* уменьшение ошибки первого рода на 13,96 %;
- для способа на основе анализа *STE* уменьшение ошибки первого рода на 8,24 %;
- для способа на основе совместного анализа *ZCR* и *STE* уменьшение ошибки первого рода на 5,72 %;
- для способа на основе анализа *ODMD* уменьшение ошибки первого рода на 17,85 %.

Повышение эффективности сегментации участков пауз отмечается только у способов на основе анализа *STE* и совместного анализа *ZCR* и *STE* – уменьшение ошибки второго рода на 1,42 и 2,31 % соответственно. Для способа на основе анализа *ZCR* отмечается ухудшение – увеличение ошибки на 3,91 %. Для способа на основе анализа *ODMD* точность сегментации не изменилась.

2. Наилучший результат сегментации речи на информативные участки с ошибками первого и второго рода 1,6 и 3,02 % соответственно достигается способом на основе совместного анализа *ZCR* и *STE* (при анализе информативного сигнала 3 методом МДЭМ с длительностью исследуемых фрагментов 50 мс) (см. табл. 2–4).

3. Наилучший результат сегментации речи на информативные участки для всех способов достигается при использовании метода МДЭМ и длительности исследуемых фрагментов 50 мс. Важно отметить, что применение методов ДЭМ и улучшенной ПМДЭМАШ, а также длительностей фрагментов 10 и 30 мс также обеспечивает приемлемые результаты сегментации речь/пауза (в пределах 4 % для среднеарифметических значений ошибок 1-го и 2-го рода).

В перспективе коллективом авторов планируется провести исследование помехоустойчивости и быстродействия способов на основе анализа *ZCR*, *STE*, совместного анализа *ZCR* и *STE*, а также анализа *ODMD* за счет применения методов ДЭМ на этапе предварительной обработки.

Список литературы

1. Martin A., Charlet D., Mauuary L. Robust speech/non-speech detection using LDA applied to MFCC // 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221) (ICASSP2001) (May 7–11, 2001). Salt Lake City, UT, USA. Vol. 1. P. 237–240.
2. Hlavnička J., Čmejla R., Tykalová T., Šonka K., Růžicka E., Ruzs J. Automated analysis of connected speech reveals early biomarkers of Parkinson's disease in patients with rapid eye movement sleep behaviour disorder // Scientific Reports. 2017. Vol. 7 (12). 13 p.
3. Atal B., Rabiner L. R. A pattern recognition approach to voiced unvoiced-silence classification with applications to speech recognition // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 1976. Vol. 24, № 3. P. 201–212.
4. Huang, X., Acero A., Hon H.-W. Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Developmen. New Jersey : Prentice Hall, 2001. 980 p.
5. Childers D. G., Hand M., Larar J. M. Silent and voiced/unvoiced/ mixed excitation (four-way), classification of speech // IEEE Transaction on ASSP. 1989. Vol. 37, № 11. P. 1771–1774.
6. Duda R. O., Hart P. E., Strok D. G. Pattern Classification. 2nd ed. New Jersey : A Wiley-Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 688 p.

7. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Султанов Б. В. Способ определения формантной разборчивости речи для оценки психоэмоционального состояния операторов систем управления с высокой степенью ответственности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 4 (30). С. 58–69.
8. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Артамонов Д. В. Помехоустойчивый алгоритм определения просодических характеристик речевых сигналов для систем оценки психоэмоционального состояния человека // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2019. № 3 (51). С. 3–16.
9. Алимуратов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П. Оценка психоэмоционального состояния человека на основе декомпозиции на эмпирические моды и кепстрального анализа речевых сигналов // Вестник Пензенского государственного университета. 2018. № 2. С. 89–95.
10. Huang, N. E., Zheng Sh., Steven R. L. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society of London. 1998. A 454. P. 903–995.
11. Zhaohua W., Huang N. E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method // Advances in Adaptive Data Analysis. 2009. № 1 (1). P. 1–41.
12. Yeh J.-R., Shieh J.-S., Huang N. E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method // Advances in Adaptive Data Analysis. 2010. № 2 (2). P. 135–156.
13. Torres M. E., Colominas M. A., Schlotthauer G., Flandrin P. A complete Ensemble Empirical Mode decomposition with adaptive noise // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-11) (May 22–27, 2011). Prague, Czech Republic, 2011. P. 4144–4147.
14. Colominas M. A., Schlotthauer G., Torres M. E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing // Biomed. Signal Proces. 2014. Vol. 14. P. 19–29.
15. Greenwood M. A., Kinghorn A. SUVing: automatic silence/unvoiced/voiced classification of speech // Undergraduate Coursework, Department of Computer Science, The University of Sheffield, UK, 1999. 4 p.
16. Saha G., Chakroborty S., Senapat S. A new silence removal and endpoint detection algorithm for speech and speaker recognition applications // Eleventh National Conference on Communications (NCC-2005) (Jan. 28–30, 2005). Kharagpur, India, 2005. P. 51–61.
17. Алимуратов А. К., Фокина Е. А., Журина А. Е. Исследование влияния длительности анализируемых речевых сигналов на частотно-избирательные свойства декомпозиции на эмпирические моды // Новые информационные технологии и системы : сб. науч. ст. XVI Междунар. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 27 – 29 ноября 2019 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 201–205.
18. Alimuradov A. K., Churakov P. P., Tychkov A. Yu., Artemov I. I., Kuzmin A. V. Improvement of the Efficiency of Voice Control Based on the Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016) (May 12–14, 2016). Moscow, Russia, 2016. 6 p.
19. National University of Entre Ríos. The Laboratory of Signals and Nonlinear Dynamics, Faculty of Engineering. URL: <http://www.bioingenieria.edu.ar/grupos/ldnlys>. (дата обращения: 01.05.2021).

References

1. Martin A., Charlet D., Mauuary L. Robust speech/non-speech detection using LDA applied to MFCC. 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal

- Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221) (ICASSP2001) (May 7–11, 2001)*. Salt Lake City, UT, USA. 2001;1:237–240.
2. Hlavnička J., Čmejla R., Tykalová T., Šonka K., Růžicka E., Ruzs J. Automated analysis of connected speech reveals early biomarkers of Parkinson's disease in patients with rapid eye movement sleep behaviour disorder. *Scientific Reports*. 2017;7(12):13.
 3. Atal B., Rabiner L.R. A pattern recognition approach to voiced unvoiced-silence classification with applications to speech recognition. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* 1976;24(3):201–212.
 4. Huang, X., Acero A., Hon H.-W. *Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Developmen*. New Jersey: Prentice Hall, 2001:980.
 5. Childers D.G., Hand M., Larar J.M. Silent and voiced/unvoiced/ mixed excitation (four-way), classification of speech. *IEEE Transaction on ASSP*. 1989;37(11):1771–1774.
 6. Duda R.O., Hart P.E., Strok D.G. *Pattern Classification. 2nd ed*. New Jersey: A Wiley-Interscience Publ. John Wiley & Sons, Inc., 2001:688.
 7. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Sultanov B.V. A method for determining formatted speech intelligibility for assessing the psychoemotional state of control system operators with a high degree of responsibility. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2019;4(30):58–69. (In Russ.)
 8. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P., Artamonov D.V. Noise-resistant algorithm for determining the prosodic characteristics of speech signals for systems assessing the psychoemotional state of a person. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2019;3(51):3–16. (In Russ.)
 9. Alimuradov A.K., Tychkov A.Yu., Churakov P.P. Assessment of the psychoemotional state of a person based on the decomposition into empirical modes and cepstral analysis of speech signals. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University*. 2018;2:89–95. (In Russ.)
 10. Huang N.E., Zheng Sh., Steven R.L. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1998;A454:903–995.
 11. Zhaohua W., Huang N.E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*. 2009;1(1):1–41.
 12. Yeh J.-R., Shieh J.-S., Huang N.E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*. 2010;2(2):135–156.
 13. Torres M.E., Colominas M.A., Schlotthauer G., Flandrin P. A complete Ensemble Empirical Mode decomposition with adaptive noise. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP-11) (May 22–27, 2011)*. Prague, Czech Republic, 2011:4144–4147.
 14. Colominasa M.A., Schlotthauera G., Torres M.E. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing. *Biomed. Signal Proces*. 2014;14:19–29.
 15. Greenwood M.A., Kinghorn A. SUVing: automatic silence/unvoiced/voiced classification of speech. *Undergraduate Coursework, Department of Computer Science, The University of Sheffield, UK*, 1999:4.
 16. Saha G., Chakroborty S., Senapat S. A new silence removal and endpoint detection algorithm for speech and speaker recognition applications. *Eleventh National Conference on Communications (NCC-2005) (Jan. 28–30, 2005)*. Kharagpur, India, 2005:51–61.
 17. Alimuradov A.K., Fokina E.A., Zhurina A.E. Studying the influence of the duration of the analyzed speech signals on the frequency-selective properties of the decomposition into empirical modes. *Novye informatsionnye tekhnologii i sistemy: sb. nauch. st. XVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 27 – 29 noyabrya 2019 g.) = New information technologies and systems: proceedings of the 16th International scientific and*

technical conference (Penza, November 27-29, 2019). Penza: Izd-vo PGU, 2019:201–205. (In Russ.)

18. Alimuradov A.K., Churakov P.P., Tychkov A.Yu., Artemov I.I., Kuzmin A.V. Improvement of the Efficiency of Voice Control Based on the Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016) (May 12–14, 2016)*. Moscow, Russia, 2016:6.
19. *National University of Entre Ríos. The Laboratory of Signals and Nonlinear Dynamics, Faculty of Engineering*. Available at: <http://www.bioingenieria.edu.ar/grupos/ldnlys>. (accessed 01.05.2021).

Информация об авторах / Information about the authors

Алан Казанферович Алимуратов

кандидат технических наук, доцент
кафедры радиотехники
и радиоэлектронных систем,
директор студенческого научно-
производственного бизнес-инкубатора,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alan K. Alimuradov

Candidate of engineering sciences, associate
professor of the sub-department of radio
engineering and radioelectronic systems,
director of the student research
and production business incubator,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Тычков

доктор технических наук, заведующий
кафедрой радиотехники и
радиоэлектронных систем,
заместитель директора научно-
исследовательского института
фундаментальных и прикладных
исследований, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: tychkov-a@mail.ru

Aleksandr Yu. Tychkov

Doctor of engineering sciences, head
of the sub-department of radio engineering
and radioelectronic systems, deputy
director of the Research Institute
for Basic and Applied Studies, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Петр Павлович Чураков

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информационно-
измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: churakov-pp@mail.ru

Petr P. Churakov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of information and measuring technology
and metrology, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алексей Викторович Агейкин

ассистент кафедры микробиологии,
эпидемиологии и инфекционных
болезней, Медицинский институт,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ageykinav@yandex.ru

Aleksey V. Ageykin

Assistant of the sub-department
of microbiology, epidemiology
and infectious diseases, Medical Institute,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Андрей Викторович Кузьмин

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-
вычислительных систем, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: a.v.kuzmin@pnzgu.ru

Andrey V. Kuz'min

Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of information and computing systems,
Penza State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Максим Александрович Митрохин

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой вычислительной
техники, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: mmax83@mail.ru

Maksim A. Mitrokhin

Doctor of engineering sciences, associate
professor, head of the sub-department
of computing technology, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Игорь Алексеевич Чернов

студент, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: igorchernov999@mail.ru

Igor' A. Chernov

Student, Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 12.05.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 25.05.2021

Принята к публикации / Accepted 07.06.2021

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.391:621.396.96
doi:10.21685/2072-3059-2021-2-4

Анализ автокомпенсаторов доплеровского сдвига фазы пассивных помех

Д. И. Попов

Рязанский государственный радиотехнический университет
имени В. Ф. Уткина, Рязань, Россия

adop@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются автокомпенсаторы доплеровского сдвига фазы пассивных помех на основе квазиоптимальных (упрощенных) дискриминаторов, использующих суммарно-разностные алгоритмы. Целью работы является сравнительный анализ точности автокомпенсации в зависимости от параметров пассивных помех и объема обучающей выборки. *Материалы и методы.* На основе синтезированных методом максимального правдоподобия дискриминационных алгоритмов рассмотрены принципы построения дискриминаторов и автокомпенсаторов замкнутого типа. *Результаты.* Приведены алгоритмы и структурная схема автокомпенсатора замкнутого типа, а также числовые результаты сравнительного анализа точности автокомпенсации при использовании различных дискриминаторов. *Выводы.* Рассмотренные автокомпенсаторы замкнутого типа позволяют осуществить выбор структур и параметров их узлов в зависимости от требований, предъявляемых к точности компенсации, длительности переходного процесса и сложности аппаратно-программной реализации. Оптимальные дискриминаторы на основе суммарно-разностных алгоритмов открывают возможности построения более простых в реализации квазиоптимальных дискриминаторов. Анализ автокомпенсаторов с оптимальными и квазиоптимальными дискриминаторами показывает, что рассмотренные упрощения приводят к незначительному снижению точности компенсации, позволяющему рекомендовать предложенные автокомпенсаторы для практического применения.

Ключевые слова: автокомпенсаторы, анализ, доплеровский сдвиг фазы, дискриминаторы, обучающая выборка, пассивная помеха, принципы построения, суммарно-разностные алгоритмы, точность автокомпенсации

Для цитирования: Попов Д. И. Анализ автокомпенсаторов доплеровского сдвига фазы пассивных помех // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 44–52. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-4

Analysis of Doppler auto-compensators phase shift of passive interference

© Попов Д. И., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

D.I. Popov

Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin, Ryazan, Russia
adop@mail.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is the Doppler autocompensators phase shift of passive interference based on quasi-optimal (simplified) discriminators using sum-difference algorithms. The purpose of the work is a comparative analysis of the accuracy of autocompensation depending on the parameters of passive interference and the volume of the training sample. *Materials and methods.* On the basis of discriminatory algorithms synthesized by the maximum likelihood method, the principles of constructing closed-type discriminators and autocompensators are considered. *Results.* Algorithms and a block diagram of a closed-loop auto-compensator are presented, as well as numerical results of a comparative analysis of the accuracy of auto-compensation using various discriminators. *Conclusions.* The considered closed-loop auto-compensators allow for the selection of structures and parameters of their nodes, depending on the requirements for the accuracy of compensation, the duration of the transient process, and the complexity of the hardware implementation. Optimal discriminators based on sum-difference algorithms open up the possibility of constructing quasioptimal discriminators that are easier to implement. The analysis of autocompensators with optimal and quasi-optimal discriminators shows that the considered simplifications lead to an insignificant decrease in the accuracy of compensation, which allows us to recommend the proposed autocompensators for practical use.

Keywords: autocompensators, analysis, Doppler phase shift, discriminators, training sample, passive interference, construction principles, sum-difference algorithms, autocompensation accuracy

For citation: Popov D.I. Analysis of Doppler auto-compensators phase shift of passive interference. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;2:44–52. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-4

Введение

При выделении сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех основной операцией является режектирование спектральных составляющих помехи [1–3]. В условиях априорной неопределенности характеристик пассивных помех широкое применение находят адаптивные режекторные фильтры (АРФ) [4–6]. В работе [4] предложен метод синтеза АРФ с комплексными весовыми коэффициентами нерекурсивного и рекурсивного типов с полной или частичной адаптацией. Практическая реализация данных АРФ в цифровом виде предполагает использование комплексных перемножителей (цифровых фазовращателей), число которых пропорционально порядку фильтра. Данное обстоятельство усложняет структуру АРФ, особенно высоких порядков, и затрудняет обработку сигналов в реальном масштабе времени при ограниченном быстродействии элементов цифровой техники. Кроме того, остатки режектированной помехи на выходе АРФ с комплексными весовыми коэффициентами сохраняют доплеровские сдвиги фазы, что приводит к необходимости их компенсации при последующей когерентной обработке. С целью преодоления указанных трудностей следует отдельно решать задачи автокомпенсации доплеровского сдвига фазы помехи и последующего ее подавления в фильтре с действительными весовыми коэффициентами.

Известные автокомпенсаторы замкнутого типа содержат оптимальные дискриминаторы, основанные на операции комплексного перемножения [7].

Особенностью автокомпенсаторов замкнутого типа является возможность применения различных дискриминаторов, реализующих заданную точность компенсации не только за счет прямого усреднения поступающих данных, но и за счет инерционности обратной связи и, следовательно, длительности переходного процесса. Последнее может оказаться неприемлемым для систем обнаружения, но не препятствует применению автокомпенсаторов замкнутого типа в системах сопровождения.

Рассмотрим автокомпенсаторы на основе упрощенных (квазиоптимальных) дискриминаторов и проанализируем точность компенсации доплеровского сдвига фазы помехи.

1. Построение дискриминаторов

Полагаем, что помеха, создаваемая отражениями от протяженных объектов, располагается в двумерном строге азимут – дальность. В каждом элементе разрешения по дальности эта помеха задается последовательностью M выборочных значений комплексных огибающих $U_j = x_j + iy_j$, следующих вдоль азимута с периодом повторения T и образующих вектор-столбец $\{U_j\} = \{U_1, \dots, U_M\}^T$, описываемый корреляционной матрицей $[R_{jk}]$ с элементами

$$R_{jk} = \overline{U_j U_k^*} / 2\sigma_{\Pi}^2 = \rho_{jk} e^{i(j-k)\varphi} + \lambda \delta_{jk},$$

где ρ_{jk} – коэффициенты межпериодной корреляции помехи; φ – доплеровский сдвиг фазы помехи за период повторения T ; $\lambda = \sigma_{\text{ш}}^2 / \sigma_{\Pi}^2$ – отношение шум/помеха; δ_{jk} – символ Кронекера.

В этом случае в пределах n смежных элементов разрешения по дальности образуется обучающая выборка в виде совокупности n векторов $\{U_{jl}\} = \{U_1, \dots, U_M\}^T$, $l = \overline{1, n}$. Для оценивания величины φ достаточно данных двух смежных периодов повторения $\{U_{j-1,l}, U_{jl}\}^T$, при этом алгоритм оценивания рассогласования $\Delta\varphi$ между истинным и отслеживаемым автокомпенсатором значением φ в j -м периоде имеет вид

$$\Delta\hat{\varphi}_j = a_j / b_j, \quad (1)$$

где a_j , b_j – величины, которые вычисляются в соответствии с прямыми алгоритмами [7], содержащими операцию комплексного перемножения отсчетов $U_{j-1,l}$, U_{jl} , или с косвенными (суммарно-разностными) алгоритмами [8], свободными от этой операции.

В обоих случаях алгоритмы оценивания синтезируются методом максимального правдоподобия, что приводит к оптимальным структурам дискриминатора. Однако суммарно-разностные алгоритмы открывают возможности для дальнейших упрощений. В соответствии с модифицированными алгоритмами, оперирующими только с суммарными (разностными) значениями [8], имеем

$$\left. \begin{aligned} a_j &= \sum_{l=1}^n (\mp |U_{j-1,l} \pm iU_{jl}|^2 \pm |U_{j-1,l} \mp iU_{jl}|^2) \\ b_j &= \sum_{l=1}^n (\pm |U_{j-1,l} \pm U_{jl}|^2 \mp |U_{j-1,l} \mp U_{jl}|^2) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Дискриминатор на основе алгоритмов (2) реализует усреднение n элементов по дальности. Дополнительно может быть осуществлено межпериодное усреднение величин a_j , b_j , позволяющее повысить точность измерения.

В системах сопровождения с целью уменьшения инерционности отслеживания по дальности представляется целесообразным полностью использовать возможности межпериодного усреднения, сокращая усреднение по дальности или отказываясь от него совсем. В системах обнаружения для оперативной компенсации доплеровского сдвига фазы представляет интерес минимально необходимое число периодов $M = 2$.

Дискриминаторы на основе суммарно-разностных алгоритмов можно значительно упростить, учитывая, что для эффективной компенсации доплеровского сдвига фазы помехи достаточно соответствия между сигналом ошибки на выходе дискриминатора и исходным рассогласованием. Для этого характеристика дискриминатора с положительным наклоном должна проходить через начало координат. Упростим вычисления, заменив операции возведения в квадрат в алгоритме (2) операциями вычисления модулей. Алгоритмы (2) при этом преобразуются к виду

$$\left. \begin{aligned} a_{0j} &= \sum_{l=1}^n (\mp |x_{j-1,l} \mp y_{jl}| \mp |y_{j-1,l} \pm x_{jl}| \pm |x_{j-1,l} \pm y_{jl}| \pm |x_{j-1,l} \mp x_{jl}|) \\ b_{0j} &= \sum_{l=1}^n (\pm |x_{j-1,l} \pm x_{jl}| \pm |y_{j-1,l} \pm y_{jl}| \mp |x_{j-1,l} \mp x_{jl}| \mp |y_{j-1,l} \mp y_{jl}|) \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Рассматривая свойства проекций при различных положениях разности векторов $(U_{j-1} - U_j)$, получаем эвристическим путем простой и удобный для практического применения алгоритм оценивания рассогласования:

$$\Delta \hat{\phi}_j = \sum_{l=1}^n [(\operatorname{sgn} x_{jl})(y_{j-1,l} - y_{jl}) - (\operatorname{sgn} y_{jl})(x_{j-1,l} - x_{jl})] / c_{12}, \quad (4)$$

где $c_{12} = \sum_{l=1}^n (|U_{j-1,l}|^2 + |U_{jl}|^2)$ – нормирующий коэффициент, определяемый при $k = M = 2$.

Отметим, что дискриминатор может быть построен на основе взаимно расстроенных линейных избирательных цепей, выполненных на цифровых линиях задержки. Дискриминаторы с разрешающей способностью по дальности в пределах одного или группы элементов разрешения удастся построить на основе простейших фильтров с прямой (схем однократной череспериодной компенсации) или обратной запаздывающей связью (рециркуляторов). В по-

следнем случае характеристики дискриминатора (крутизна и ширина линейного участка) могут регулироваться путем выбора величины расстройки и коэффициента обратной связи.

2. Принципы построения автокомпенсаторов

Рассмотрим теперь построение автокомпенсаторов. Представляют интерес цифровые методы компенсации непосредственно на видеочастоте, что позволяет осуществлять безынерционную компенсацию доплеровского сдвига фазы помехи по дальности. Структурная схема цифрового АРФ с автокомпенсатором замкнутого типа приведена на рис. 1 где $\dot{\times}$ – комплексный перемножитель; РФ – режекторный фильтр; ЗУ_Т – запоминающее устройство на интервал T ; В – вычислитель полного сдвига фазы; СФ – сглаживающий фильтр; Д – делитель; Н – накопитель. Дискриминатор, выполненный в соответствии с алгоритмом (4), использует входные и выходные отсчеты первого звена режекторного фильтра.

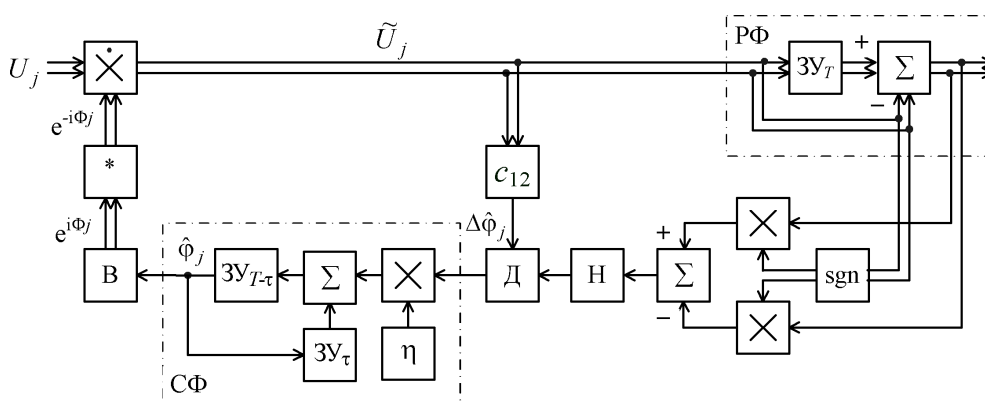


Рис. 1. Структурная схема АРФ с автокомпенсатором замкнутого типа

От дискриминатора текущие оценки рассогласования $\Delta\hat{f}_j$ поступают на вход сглаживающего фильтра (СФ). В СФ осуществляется взвешивание оценок с помощью весового коэффициента η и раздельное по каждому элементу разрешения накопление взвешенных величин, что приводит к сглаживанию оценок и образованию в установившемся режиме оценки межпериод-

ного сдвига фазы $\hat{\phi}_j = \eta \sum_{k=1}^j \Delta \hat{\phi}_k$. Величина весового коэффициента η опре-

делает коэффициент передачи разомкнутой петли автокомпенсатора и влияет на его динамические свойства и флюктуационную ошибку. С целью временного согласования со средним элементом обучающей выборки значения $\hat{\phi}_j$ на вход вычислителя (В) поступают с задержкой на интервал $T - \tau$, где τ – задержка оценок по отношению к среднему элементу обучающей выборки.

В соответствии с рис. 2, *a* полный сдвиг фазы $\Phi_j = \sum_{k=1}^j \hat{\phi}_k$, абсолютная величина которого не превышает 2π , вычисляется в результате накопления

оценок и нормализации накопленных сумм в сумматоре-нормализаторе (СН). Другой вариант реализации вычислителя (В) основывается на косинусно-синусном преобразовании оценок и последующем вычислении величины $e^{i\Phi_j} = e^{i\Phi_{j-1}} \cdot e^{i\hat{\Phi}_j} = e^{i j \hat{\Phi}}$ с помощью комплексного перемножителя ($\times$) и запоминающего устройства $ЗУ_T$ (рис. 2, б).

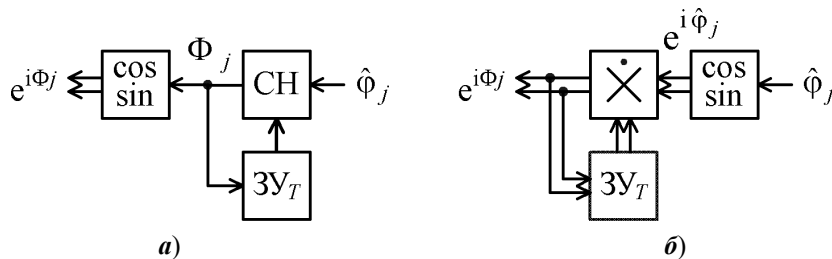


Рис. 2. Схема вычислителя полного сдвига фазы

Компенсация доплеровского сдвига фазы помехи осуществляется путем комплексного перемножения в блоке $\times$ входных отсчетов U_j с выходной величиной $e^{-i\Phi_j}$ блока комплексного сопряжения $*$ (см. рис. 1). Выходные отсчеты комплексного перемножителя $\tilde{U}_j = U_j e^{-i j \hat{\Phi}}$ в установившемся режиме не содержат доплеровских сдвигов фазы помехи с точностью до погрешностей измерения оценки $\hat{\Phi}$.

Режектирование «остановленной» помехи осуществляется фильтром с действительными весовыми коэффициентами. Адаптация последних основывается на известных алгоритмах [4] и предполагает использование измерителей коэффициентов корреляции, выполняемых в данном случае также по упрощенным алгоритмам. В частности, алгоритм на основе модифицированного варианта суммарно-разностных преобразований [8] принимает вид

$$\hat{\rho}_{lk} = \frac{\sum_{j=k}^M \sum_{l=1}^n (\pm |U_{j-k+1,l} \pm U_{jl}|^2 \mp |U_{j-k+1,l} \mp U_{jl}|^2)}{\sum_{j=k}^M \sum_{l=1}^n (|U_{j-k+1,l} \pm U_{jl}|^2 + |U_{j-k+1,l} \mp U_{jl}|^2)}.$$

В случае многозвенного (каскадного) построения режекторного фильтра для вычисления оценки $\hat{\rho}_{12} = \hat{\rho}$ могут быть использованы выходные отсчеты первого каскада РФ – схемы череспериодной компенсации, изображенной на рис. 1. При этом каскадное построение РФ открывает новые возможности адаптации.

3. Анализ точности автокомпенсации

Анализ точности компенсации проведем на основе известного выражения для дисперсии флюктуационной ошибки $\sigma_{\hat{\Phi}}^2 = 2S_{\text{ЭКВ}} \Delta f_{\text{ЭФ}}$, где $S_{\text{ЭКВ}}$ – эк-

вивалентная спектральная плотность флуктуаций; $\Delta f_{\text{эф}}$ – эффективная полоса пропускания автокомпенсатора [7].

Для оптимального дискриминатора на основе суммарно-разностных алгоритмов находим эквивалентную спектральную плотность:

$$S_{\text{экв}} = S_{\text{опт}} = - \left\{ \overline{\partial^2 \ln L(\{V_{jl}\}/\varphi) / \partial \varphi^2} \right\}^{-1},$$

где $L(\{V_{jl}\}/\varphi)$ – функция правдоподобия для результатов суммарно-разностных преобразований V_{jl} [8].

После соответствующих вычислений с учетом приведенного в работе [8] выражения для функции правдоподобия при $M=2$ для оптимального дискриминатора на основе суммарно-разностных алгоритмов получим

$$S_{\text{опт}} = [(1 + \lambda)^2 - \rho^2] / 2n\rho^2.$$

Рассматривая автокомпенсатор как дискретную систему, находим эффективную полосу пропускания

$$2\Delta f_{\text{эф}} = \frac{1}{2\pi i} \oint_{|z|=1} G(z)G(z^{-1}) \frac{dz}{z}, \quad (5)$$

где $G(z) = K_d H(z) / [1 + K_d H(z)]$; K_d – крутизна дискриминатора; $H(z)$ – системная функция сглаживающего фильтра в z -плоскости.

Для рассмотренных оптимальных дискриминаторов имеем $K_d = 1$, системная функция сглаживающего фильтра, представленного на рис. 1, $H(z) = \eta / (z - 1)$. После вычисления интеграла (5) получим $2\Delta f_{\text{эф}} = \eta / (2 - \eta)$. Окончательно имеем

$$\sigma_{\varphi}^2 = \eta [(1 + \lambda)^2 - \rho^2] / 2(2 - \eta)n\rho^2. \quad (6)$$

В частности, определив полюс $z_p = 1 - K_d \eta$ системной функции $G(z)$, нетрудно найти, что условию устойчивости автокомпенсатора $|z_p| < 1$ соответствует величина весового коэффициента $0 < \eta < 2$.

Для гауссовского спектра помехи с нормированной шириной $\beta_{\Pi} = \Delta f_{\Pi} T = 0,05$ при $\eta = 1$ и $\lambda \leq 10^{-4}$ на рис. 3 представлены зависимости среднеквадратичных ошибок доплеровской фазы σ_{φ} от числа усредняемых отсчетов n . Кривая 1 соответствует расчетам по формуле (6), кривая 2 – моделированию автокомпенсатора с дискриминатором на основе алгоритмов (1) и (2), а кривая 3 – моделированию автокомпенсатора с дискриминаторами на основе квазиоптимальных алгоритмов (3) и (4), реализующих практически одинаковую точность компенсации.

Результаты моделирования оптимальных алгоритмов (кривая 2) подтверждают асимптотическую эффективность оценок, получаемых в замкнутых измерителях, и, следовательно, предельную точность компенсации до-

плеровского сдвига фазы помехи, а также эквивалентность дискриминаторов на основе прямых и косвенных алгоритмов. Из результатов моделирования квазиоптимальных алгоритмов (кривая 3) следует, что упрощения приводят к несущественному снижению точности компенсации. Реализация алгоритмами (3) и (4) практически одинаковой точности компенсации позволяет отдать предпочтение последнему – более простому. Величина $\eta=1$ соответствует минимальной длительности переходного процесса. В общем случае величина η совместно с величиной n может выбираться из условия обеспечения заданной точности компенсации.

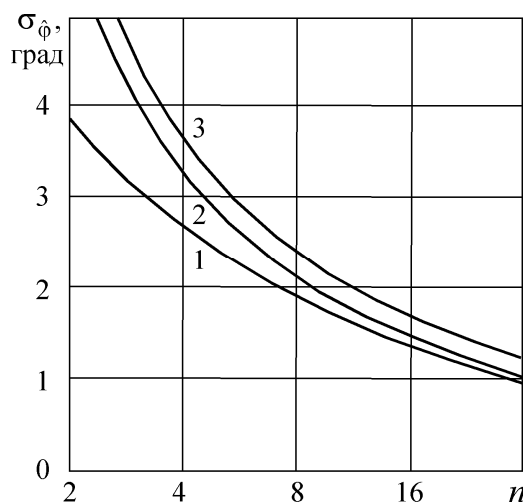


Рис. 3. Зависимости среднеквадратичных ошибок доплеровского сдвига фазы помехи от числа усредняемых отсчетов

Заключение

Рассмотренные автокомпенсаторы замкнутого типа позволяют осуществить выбор структур и параметров их узлов в зависимости от требований, предъявляемых к точности компенсации, длительности переходного процесса и сложности аппаратно-программной реализации.

Оптимальные дискриминаторы на основе суммарно-разностных алгоритмов открывают возможности построения более простых в реализации квазиоптимальных дискриминаторов.

Анализ автокомпенсаторов с оптимальными и квазиоптимальными дискриминаторами показывает, что рассмотренные упрощения приводят к несущественному снижению точности компенсации, позволяющему рекомендовать предложенные автокомпенсаторы для практического применения.

Список литературы

1. Radar Handbook / ed. by M. I. Skolnik. 3rd ed. McGraw-Hill, 2008. 1352 p.
2. Richards M. A., Scheer J. A., Holm W. A. Principles of Modern Radar: Basic Principles. New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2010. 924 p.
3. Melvin W. L., Scheer J. A. Principles of Modern Radar: Advanced Techniques. New York : SciTech Publishing, IET, Edison, 2013. 846 p.
4. Попов Д. И. Синтез цифровых адаптивных режекторных фильтров // Радиотехника. 1981. Т. 36, № 10. С. 53–57.

5. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию. Киев : Изд-во «КВиЦ», 2000. 428 с.
6. Richards M. A. *Fundamentals of Radar Signal Processing*, Second Edition. New York : McGraw–Hill Education, 2014. 618 p.
7. Попов Д. И. Автокомпенсация доплеровской фазы пассивных помех // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 2. С. 30–33.
8. Попов Д. И. Оценивание параметров пассивных помех на основе косвенных алгоритмов // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2019. Т. 62, № 1. С. 54–63.

References

1. Skolnik M. I. (ed.). *Radar Handbook*. 3rd ed. McGraw–Hill, 2008:1352.
2. Richards M.A., Scheer J.A., Holm W.A. *Principles of Modern Radar: Basic Principles*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2010:924.
3. Melvin W.L., Scheer J.A. *Principles of Modern Radar: Advanced Techniques*. New York: SciTech Publishing, IET, Edison, 2013:846.
4. Popov D.I. Synthesis of digital adaptive notch filters. *Radiotekhnika = Radio engineering*. 1981;36(10):53–57. (In Russ.)
5. Kuz'min S.Z. *Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu = Digital radar. Introduction to theory*. Kiev: Izd-vo «KViTs», 2000:428.
6. Richards M.A. *Fundamentals of Radar Signal Processing, Second Edition*. New York: McGraw–Hill Education, 2014:618.
7. Popov D.I. Auto-compensation of Doppler phase of passive interference. *Tsifrovaya obrabotka signalov = Digital signal processing*. 2009;2:30–33. (In Russ.)
8. Popov D.I. Estimation of passive interference parameters based on indirect algorithms. *Izvestiya vuzov. Radioelektronika = University proceedings. Radioelectronics*. 2019;62(1):54–63. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Иванович Попов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиотехнических
систем, Рязанский государственный
радиотехнический университет имени
В. Ф. Уткина (Россия, г. Рязань,
ул. Гагарина, 59/1)

E-mail: adop@mail.ru

Dmitriy I. Popov

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department of radio
engineering systems, Ryazan State
Radio Engineering University named
after V. F. Utkin (59/1 Gagarina street,
Ryazan, Russia)

Поступила в редакцию / Received 19.02.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 15.03.2021

Принята к публикации / Accepted 25.03.2021

УДК 681.2.082

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-5

Особенности контроля металлокерамического спая в вакуумных коммутарующих устройствах

Е. А. Алимова

Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов, Пенза, Россия
Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
alimova_ae@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются металлокерамические спаи вакуумных коммутарующих устройств. Предметом исследования являются вопросы влияния толщины и химического состава металлизированного слоя на качество сцепления с керамическим корпусом вакуумных коммутарующих устройств. Целью данной работы является исследование причин, влияющих на вакуумную плотность вакуумных коммутарующих устройств. *Материалы и методы.* В работе были проведены исследования спая никеля с корундовой керамикой типа ВК94 и ВК95. Для достижения поставленной цели в работе использовались методы растровой электронной микроскопии и электронно-зондового микроанализа. *Результаты.* Установлены причины, влияющие на вакуумную плотность вакуумных коммутарующих устройств, и даны рекомендации по ее улучшению. *Выводы.* Показано, что введение в технологические процессы производства изделий электронной техники методов растровой электронной микроскопии позволяет повысить достоверность контроля на наноразмерном уровне, что, в свою очередь, приводит к улучшению тактико-технических характеристик готовых изделий.

Ключевые слова: керамика, металлокерамический спай, слой металлизации, фрактотомографический анализ, растровая электронная микроскопия, толщина слоя никеля

Для цитирования: Алимова Е. А. Особенности контроля металлокерамического спая в вакуумных коммутарующих устройствах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 53–62. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-5

Control features of the metal-ceramic seal in vacuum switching devices

E.A. Alimova

Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia
Penza State University, Penza, Russia
alimova_ae@mail.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is the metal-ceramic seals of the vacuum switching devices. The subject of the research is the thickness and chemical composition influence of the metallized layer on the adhesion quality with the ceramic body of vacuum switching devices. The purpose of this work is to study the reasons affecting the vacuum density of vacuum switching devices. *Materials and methods.* The research of nickel and corundum ceramics soldering of the VK94 and VK95 types was carried out in this work. To achieve this goal the methods of scanning electron microscopy and electron probe microanalysis were used. *Results.* The reasons influencing the vacuum density of vacuum switch-

ing devices are established and recommendations for its improvement are given. *Conclusions.* It is shown that the introduction of scanning electron microscopy methods into the technological processes of the electronic devices production makes it possible to increase the control reliability at the nanoscale level that leads to an improvement in the tactical and technical characteristics of finished products.

Keywords: ceramics, metal-ceramic seal, metallization layer, fractographic analysis, scanning electron microscopy, nickel layer thickness

For citation: Alimova E.A. Control features of the metal-ceramic seal in vacuum switching devices. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;2:53–62. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-5

Введение

«Вакуумные коммутирующие устройства (ВКУ) широко используются в радиотехнической аппаратуре для коммутации высоких напряжений и больших токов в наносекундном диапазоне (рис. 1). Областью применения ВКУ являются стационарная и бортовая аппаратура связи, комплексы радио-электронного противодействия, антенно-фидерные устройства и т.д.» [1].



Рис. 1. Внешний вид вакуумных коммутирующих устройств

«ВКУ состоит из двух основных узлов: вакуумного блока с рабочими контактами и электромагнитного привода. Вакуумный блок представляет собой металлокерамическую вакуумно-плотную камеру из последовательно спаянных керамических деталей и соединительной арматуры. <...> Жесткие условия эксплуатации и повышенные требования к надежности требуют применения особых методов пайки соединений металлической арматуры ВКУ с керамическим корпусом вакуумной камеры» [1]. «Качество и надежность соединения металла с керамикой во многих случаях являются неудовлетворительными из-за разнородности природы межатомных связей этих материалов» [1]. Процесс металлизации керамики, технология пайки достаточно хорошо описаны в литературе, но нет научно обоснованных данных по оптимальной толщине слоя металлизации и слоя никелевого покрытия, по их влиянию на качество готовых изделий, нет и предложений по неразрушаю-

щим способам контроля этих параметров. В нормативной документации регламентируются 30–60 мкм для слоя металлизации и 6–9 мкм для слоя никеля без учета параметров собственно керамики. Целью данной работы является исследование причин, влияющих на вакуумную плотность ВКУ [2–10].

1. Материалы и методы исследования

«Как правило, вакуумная камера ВКУ изготавливается из корундовой (алюмооксидной) керамики типа ВК 94 и ВК 95, для которой характерны высокое поверхностное ($\approx 10^{11}$ Ом·см) и объемное ($\approx 10^{13}$ Ом·см) электрические сопротивления» [3]. «Данная керамика обладает высокой механической прочностью, низкой газопроницаемостью в широком диапазоне температур и позволяет обеспечить давление в рабочем объеме вакуумной камеры до 10^{-10} мм рт.ст. <...> Токопроводящие выводы выполняются из листовой меди» [3]. «Для снижения внутренних напряжений в спае керамического кольца с выводом и заглушкой используется компенсационное кольцо из молибдена, значение коэффициента теплового расширения (КТР) которого близко к КТР керамики» [3]. «Коммутационные характеристики ВКУ в значительной степени определяются качеством металлокерамического спая, на которое влияют следующие причины»:

- нестабильность толщины никелевого покрытия;
- наличие высокой концентрации кислорода в слое металлизации;
- превышение нормативных размеров участков стеклофазы в слое металлизации;
- низкая прочность металлокерамического спая;
- высокая пористость используемой керамики.

Нарушение вакуумной плотности – основной вид брака после пайки высокотемпературными припоями металлизированной керамики с медью или медно-никелевыми сплавами. Основными причинами нарушения качества слоя металлизации являются крупные включения стеклофазы в слое металлизации, что приводит к снижению его прочности при термоциклировании, а также недостаточная толщина слоя никеля [1], ухудшающая смачиваемость припоем.

Для исследования причин, влияющих на качество металлокерамического спая, целесообразно использовать методы растровой электронной микроскопии (РЭМ). Растровая электронная микроскопия – это метод формирования изображения путем сканирования поверхности исследуемого объекта тонко сфокусированным электронным пучком и регистрации сигналов различной природы, возникающих в результате взаимодействия электронов с веществом. Разрешение РЭМ достигает 3–10 нм.

Базой для проведения исследований является Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов (АО «НИИЭМП»), специализирующийся на разработке и промышленном выпуске ВКУ. Исследование качества спая металла с керамикой в работе проводилось с помощью растрового электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 SBH (рис. 2). Микроскоп, который использовался при проведении исследований, оснащен энергодисперсионным спектрометром «X-MAX 20», позволяющим проводить электронно-зондовый микроанализ (рис. 3). Для того чтобы определить дефекты

металлокерамического спая слоя металлизации керамики, использовался фрактографический анализ изломов спая керамики с металлом.



Рис. 2. Растровый электронный микроскоп (РЭМ) TESCAN VEGA 3 SBH



Рис. 3. Энергодисперсионный спектрометр X-MAX 20 для электронно-зондового микроанализа

2. Результаты

В работе [3] авторами были проведены исследования геометрических параметров толщины слоев и химический состав металлизированной корундовой керамики, используемой при изготовлении ВКУ. «Для первичного определения различий в химическом составе испытуемого изделия использовался детектор отраженных электронов» [3].

«Изображения, полученные при помощи отраженных электронов, несут в себе информацию о распределении различных элементов в проверяемом изделии. Далее при помощи энергодисперсионного детектора определялся химический состав в конкретной точке или средняя концентрация веществ в определенной области испытуемого изделия» [3].

Гальваническое никелирование поверхности слоя металлизации керамики типа ВК94 является самым распространенным технологическим процессом, обеспечивающим вакуумную плотность при пайке припоем ПСр72 за

счет хорошей смачиваемости. Контроль толщины никеля проводят капельным методом или измерениями на специально подготовленных микрошлифах, которые относятся к разрушающим методам, а также неразрушающим способом непосредственно на деталях. Предварительные исследования показали, что при толщине слоя никеля до 2 мкм на его поверхности обнаружено большое количество оксидов никеля, алюминия, кремния, молибдена. Такой состав существенно увеличивает время травления при капельном контроле, что приводит к завышенным результатам измерения. При контроле металлографическим методом замечено, что иногда длительная полировка шлифа вызывает «размазывание» мягкого никеля, которое приводит к завышенным результатам измерений. Анализ слоя никеля на поверхности шлифа показал наличие всех элементов, входящих в состав металлизации (рис. 4). В процессе исследований для упрощения подготовки образцов и получения более достоверных результатов был апробирован микроскопический фрактографический анализ. Предварительно перед получением качественного излома на поверхность никеля наносили слой универсального клея (ТУ 2252-023-90192380-2011 «Клей-холодная сварка»). Клей обеспечивал хорошую адгезию с поверхностью, легко раскалывался, что позволяло уменьшить влияние квазискола мягкого никеля и уверенно определить его границы.

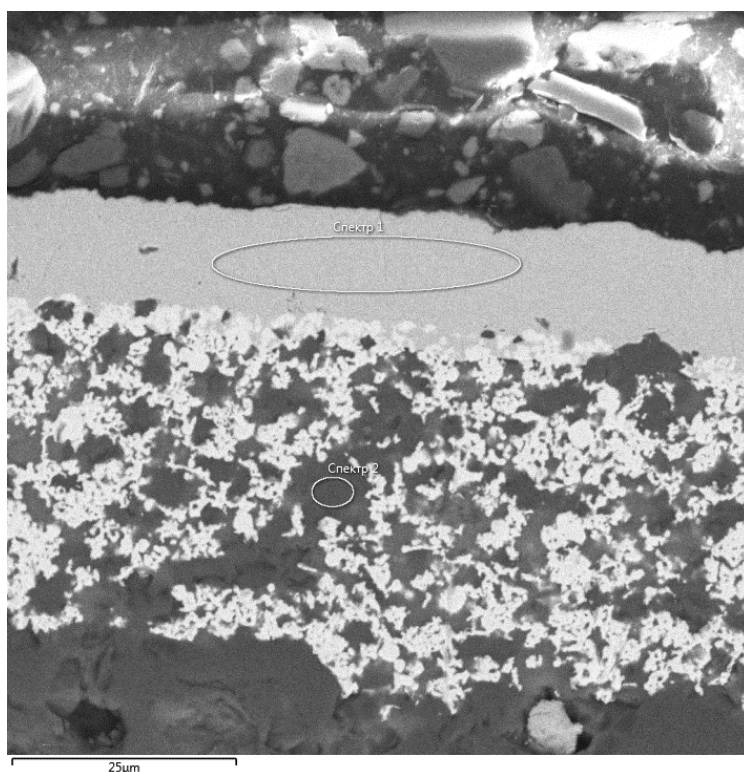


Рис. 4. Включения стеклофазы в слое металлизации

Основная трудность в нанесении гальванического никеля на слой металлизации – окисленная поверхность последнего. Приходится применять значительные усилия при обвязке деталей, чтобы обеспечить надежный контакт медной проволоки с покрываемой поверхностью, а в первые десятки се-

кунд – повышенную плотность тока. Интерес представляет применение реверсивного тока, что ускоряет процесс осаждения металлов, улучшает равномерность покрытий, снижает пористость и внутренние напряжения в слое. Однако эта технология не дала положительных результатов. Опытная партия деталей различных размеров и шириной слоя металлизации от 1 до 3 мм после нанесения никеля с применением реверсивного тока не обеспечила вакуумную плотность после пайки на 20 % деталей. Остальные детали не выдержали операции термоциклирования. Анализ показал, что толщина слоя никеля составляет 5–7 мкм, при этом обнаружено его отслаивание от основного слоя металлизации (рис. 5).

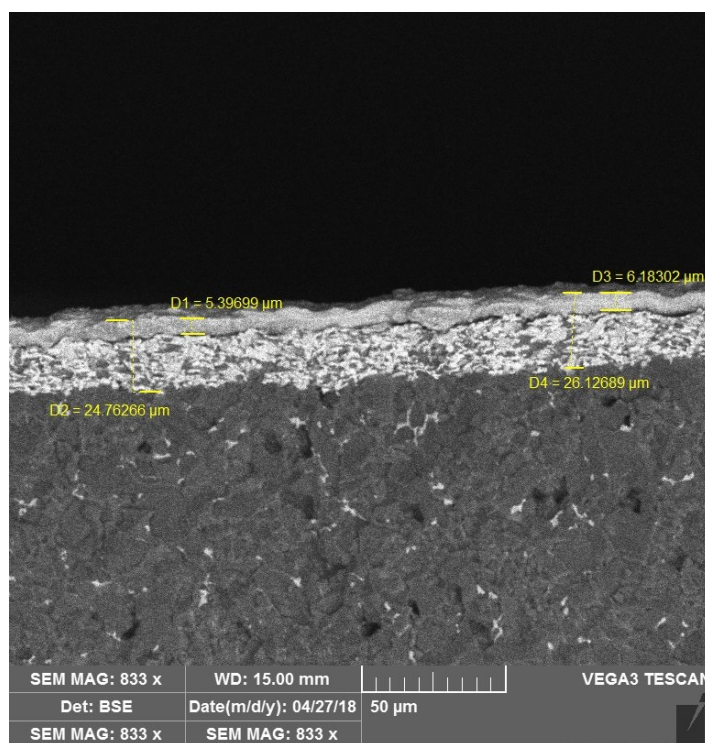


Рис. 5. Отслаивание слоя никеля при реверсе

Поверхность никеля имеет серый оттенок и высокую шероховатость, а химический анализ показал значительное содержание оксидов алюминия (рис. 6), которые присутствуют в объеме слоя никеля. Технология никелирования с применением реверса представляет определенный интерес, но необходимы дополнительные исследования. Исследование фрактограмм слоев металлизации керамики многочисленных партий деталей показало, что в подавляющих случаях толщина слоя никеля в одной партии деталей имеет большой разброс в пределах 0,3–7 мкм. Это связано с неудовлетворительным контактом медной проволоки с покрываемой поверхностью и неравномерностью распределения плотности тока при одновременной загрузке больших партий деталей в ванну никелирования.

При толщине слоя 0,3–1,2 мкм в поверхности никеля обнаружены те элементы, которые входят в состав слоя металлизации (рис. 7). Поверхность никеля с таким составом не обеспечивала качественную пайку за счет ухуд-

шения смачиваемости. При толщине никеля 1,5 мкм значительно уменьшается содержание оксидов алюминия (рис. 8). Поверхность никеля при 2 мкм не содержит примесей (рис. 9).

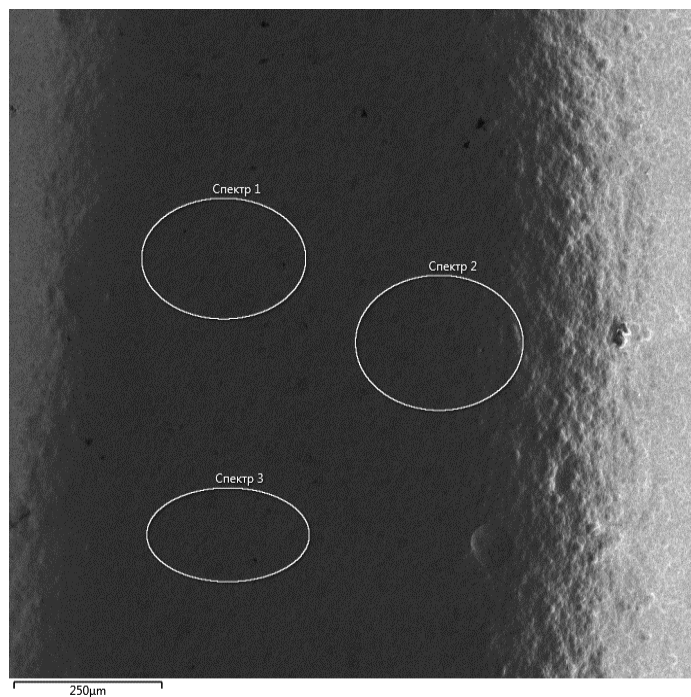


Рис. 6. Поверхность никеля, нанесенного с применением реверса

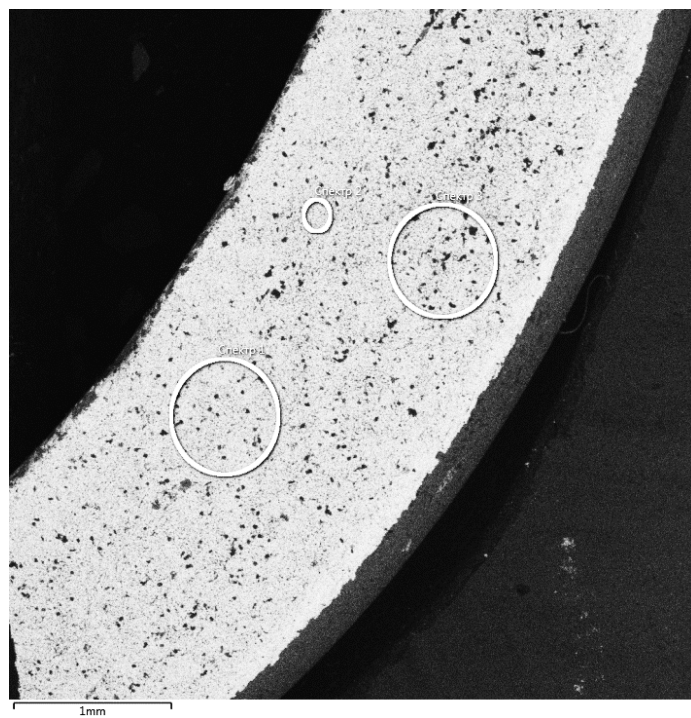


Рис. 7. Поверхность никеля при толщине менее 0,5 мкм

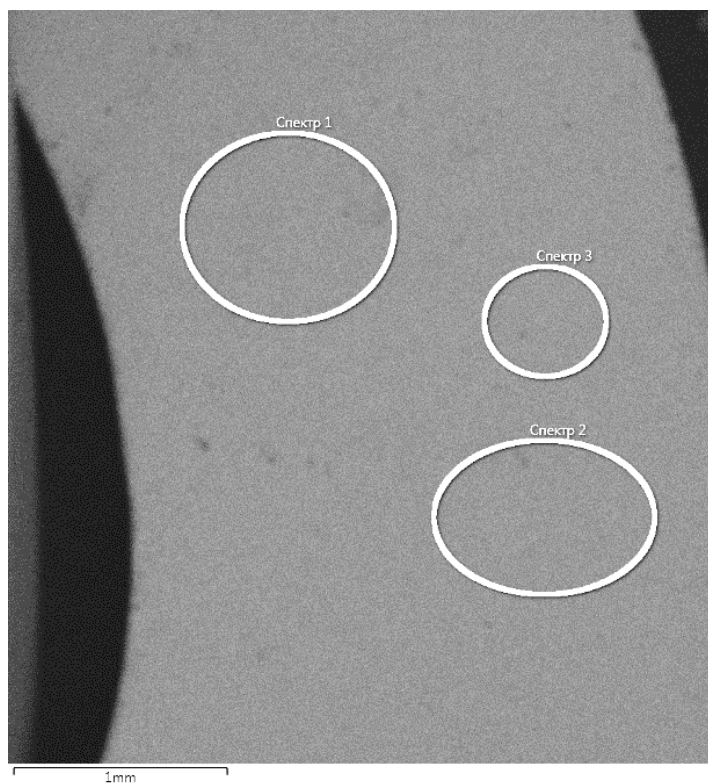


Рис. 8. Поверхность никеля при толщине 1,5 мкм

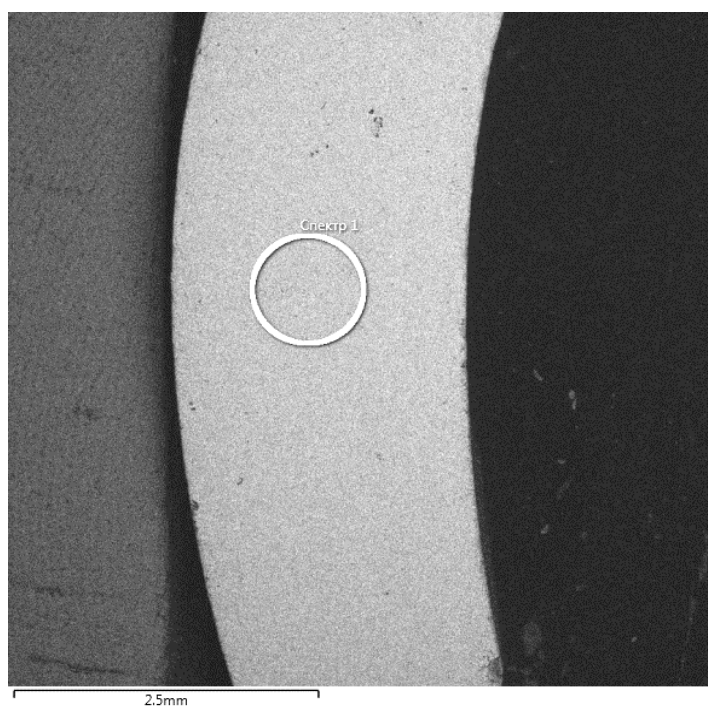


Рис. 9. Поверхность никеля при толщине 2 мкм

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что для того чтобы был обеспечен вакуумноплотный спай между корундовой керамикой и металлической арматурой в слое металлизации, кислород не должен превышать 30 %, при этом толщина самого слоя металлизации должна быть около 20–35 мкм. При толщине никелевого покрытия в 2 мкм поверхность не имеет примесей, обеспечивая хорошую смачиваемость припоем. В процессе нанесения слоя Ni необходимо обратить внимание на контакт медной проволоки с металлизированным слоем. В случае необходимости отжиг деталей после нанесения никеля следует проводить в защитной среде при 500 °С.

Список литературы

1. Дерябин Д. В., Алимова Е. А., Смирнов Г. А., Шульгин А. В., Ольховой А. А. Качество слоя металлизации керамики марок ВК94, ВК95 // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2 (22). С. 55–60.
2. Рот А. Вакуумные уплотнения. М. : Энергия, 1971. 195 с.
3. Алимова Е. А., Солодимова Г. А., Ишков А. С. Фрактографический анализ металлизированных керамических корпусов вакуумных реле // Технология металлов. 2018. № 11. С. 39–43.
4. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Э. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ : в 2 кн. : пер. с англ. М. : Мир, 1984. 303 с.
5. Брандон Д., Каплан У. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М. : Техносфера, 2006. 384 с.
6. Батаев В. А., Батаев А. А., Алхимов А. П. Методы структурного анализа материалов и контроля качества деталей. Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2006. 220 с.
7. Смирнов М. Г., Емелин Д. М., Смирнов Г. А. ТермоЭДС промышленных сталей и сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. № 4. С. 54–55.
8. Термоэлектрический анализатор металлов и сплавов ТАМИС // Контроль. Диагностика. 2017. № 3. С. 37.
9. Масленникова Г. Н., Харитонов Ф. Я., Костюков Н. С., Пирогов К. С. Технология электрокерамики. М. : Энергия, 1994. 257 с.
10. Масленникова Г. Н., Харитонов Ф. Я., Дубов И. А. Технологический расчет в керамике. М. : Стройиздат, 1994. 327 с.

References

1. Deryabin D.V., Alimova E.A., Smirnov G.A., Shul'gin A.V., Ol'khovoy A.A. The quality of the metallization layer of ceramics VK94, VK95. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2018;2(22):55–60. (In Russ.)
2. Rot A. *Vakuumnye uplotneniya = Vacuum seals*. Moscow: Energiya, 1971:195. (In Russ.)
3. Alimova E.A., Solodimova G.A., Ishkov A.S. Fractographic analysis of metallized ceramic housings of vacuum relays. *Tekhnologiya metallov = Metal technology*. 2018;11:39–43. (In Russ.)
4. Gouldsteyn Dzh., N'yuberi D., Echlin P., Dzhoy D., Fiori Ch., Lifshin E. *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenovskiy mikroanaliz: v 2 kn.: per. s angl. = Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis: in 2 books: translated from English*. Moscow: Mir, 1984:303. (In Russ.)

5. Brandon D., Kaplan U. *Mikrostruktura materialov. Metody issledovaniya i kontrolya = Microstructure of materials. Research and control methods*. Moscow: Tekhnosfera, 2006:384. (In Russ.)
6. Bataev V.A., Bataev A.A., Alkhimov A.P. *Metody strukturnogo analiza materialov i kontrolya kachestva detaley = Methods for structural analysis of materials and quality control of parts*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2006:220. (In Russ.)
7. Smirnov M.G., Emelin D.M., Smirnov G.A. TermoEDS industrial steels and alloys. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metallurgy and heat treatment of metals*. 2014;4:54–55. (In Russ.)
8. Thermoelectric analyzer of metals and alloys TAMIS. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2017;3:37. (In Russ.)
9. Maslennikova G.N., Kharitonov F.Ya., Kostyukov N.S., Pirogov K.S. *Tekhnologiya elektrokeramiki = Electroceramic technology*. Moscow: Energiya, 1994:257. (In Russ.)
10. Maslennikova G.N., Kharitonov F.Ya., Dubov I.A. *Tekhnologicheskii raschet v keramike = Technological calculation in ceramics*. Moscow: Stroyizdat, 1994:327. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Александровна Алимova

инженер-метролог, Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, (Россия, г. Пенза ул. Каракозова, 44); аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: alimova_ae@mail.ru

Elena A. Alimova

Engineer-metrologist, Research Institute of Electronic and Mechanical Devices (44 Karakozova street, Penza, Russia); postgraduate student, Penza State University (40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 23.04.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 03.05.2021

Принята к публикации / Accepted 18.05.2021

УДК 620.179.162

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-6

Верификация математической модели акустического тракта ультразвукового метода измерения расстояний до нагретой вертикальной пластины в присутствии естественной конвекции

А. В. Воронина¹, С. В. Павлов²

^{1,2}Дмитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ», Дмитровград, Ульяновская обл., Россия

¹AVVoronina@mephi.ru, ²pavlov@sosny.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Представлена математическая модель акустического тракта ультразвукового метода измерения расстояний до нагретой вертикальной пластины, разработанная в приближении геометрической акустики. На основании модели выделены факторы, влияющие на результат измерения времени распространения ультразвуковых волн. Целью работы является оценка применимости модели при разработке ультразвуковых эхо-импульсных измерительных систем. *Материалы и методы.* Верификация модели акустического тракта проводилась путем сопоставления численных и экспериментальных данных, полученных авторами при моделировании воздействия различных факторов на результаты измерений ультразвукового метода. *Результаты и выводы.* В результате проведения верификации показано, что расчетные данные, полученные с использованием разработанной модели, дают хорошее согласие с экспериментальными данными. Проведенные исследования позволили сделать вывод о том, что представленная модель может использоваться при разработке измерительных систем, основанных на ультразвуковом эхо-импульсном методе.

Ключевые слова: ультразвуковой метод, ультразвук, модель, геометрическая акустика, естественная конвекция, рефракция

Для цитирования: Воронина А. В., Павлов С. В. Верификация математической модели акустического тракта ультразвукового метода измерения расстояний до нагретой вертикальной пластины в присутствии естественной конвекции // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 63–76. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-6

Verification of the acoustic path mathematical model of the ultrasonic method for measuring distances to a heated vertical plate in conditions of natural convection

A.V. Voronina¹, S.V. Pavlov²

^{1,2}Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute, National Research Nuclear University MEPhI, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia

¹AVVoronina@mephi.ru, ²pavlov@sosny.ru

Abstract. *Background.* This article describes a mathematical model of the acoustic path of the ultrasonic method for measuring distances to a heated vertical plate, developed in the geometrical-acoustics approximation. Based on the model, the factors influencing the measurement of the propagation time of ultrasonic waves are identified. The purpose of the work is an evaluation of applicability of the model for the development of ultrasonic pulse echo measuring systems. *Materials and methods.* The model of the acoustic path is verified

by comparing the numerical data with experimental obtained by the authors when modeling the effect of various factors on the measurement results of the ultrasonic method. *Results and conclusions.* As a result of the verification shows that the calculated data obtained using the developed model, give good agreement with experimental data. The study lead to the conclusion that the presented model can be used in the development of measuring systems based on the ultrasonic echo-pulse method.

Keywords: ultrasound method, ultrasound, model, geometric acoustics, natural convection, refraction

For citation: Voronina A.V., Pavlov S.V. Verification of the acoustic path mathematical model of the ultrasonic method for measuring distances to a heated vertical plate in conditions of natural convection. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;2:63–76. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-6

Введение

Ультразвуковые эхо-импульсные методы измерения линейных размеров нашли широкое применение в различных областях техники при диагностике и контроле изделий и технологических процессов [1]. Наибольшую известность в силу своей массовости получили методы ультразвуковой толщинометрии и размерометрии, которые основаны на измерении времени распространения ультразвуковых волн в контролируемом объекте или в среде, окружающей этот объект от датчика до отражающей волны поверхности и обратно к этому же датчику. Зная скорость звука в среде распространения ультразвуковых волн, вычисляют длину пути волн и затем определяют расстояние от датчика до соответствующей отражающей поверхности [2, 3].

Как одну из разновидностей ультразвуковой размерометрии можно рассматривать класс задач, в которых измеряют расстояние от датчика до поверхности контролируемого объекта, находящегося в жидкой или газообразной средах. В частности, к таким задачам можно отнести контроль за формоизменением ядерного топлива после его эксплуатации в ядерном реакторе и выгрузке в водяной бассейн выдержки на атомной станции [4, 5].

Принцип контроля за формоизменением ядерного топлива основан на принципе работы координатно-измерительных машин [6]. С помощью ультразвуковых эхо-импульсных датчиков производится сканирование поверхности ядерного топлива. При этом измеряется расстояние от датчиков до определенных контрольных точек поверхности объекта контроля. Затем в заданной заранее системе координат высчитывают координаты контрольных точек поверхности ядерного топлива, сравнивают с эталонными значениями и определяют его формоизменение.

Одной из особенностей контроля выгруженного из реактора ядерного топлива является нейтронное и гамма-излучение, а также значительное, до сотни киловатт, остаточное тепловыделение, которое является причиной возникновения естественной конвекции у поверхности топлива. Естественная конвекция оказывает существенное влияние на распространение ультразвуковых волн в воде и, следовательно, влияет на результаты контроля.

Для создания ультразвуковой системы контроля за формоизменением ядерного топлива российских реакторов ВВЭР-1000 была разработана математическая модель акустического тракта ультразвукового эхо-импульсного метода измерения линейных размеров [7]. Модель описывает распространение ультразвуковых волн в воде с учетом естественной конвекции у поверх-

ности ядерного топлива. Волны распространяются от датчика до поверхности топлива, отражаются от нее и принимаются этим же датчиком.

Модель разработана в приближении геометрической акустики, учитывает рефракцию ультразвуковых волн, изменение скорости звука в воде вдоль траектории распространения волн и их наклонное падение на поверхность ядерного топлива. Для практического использования разработанной модели ее необходимо верифицировать, желательно с помощью экспериментально полученных данных. При этом наибольшую трудность представляет определение профиля температуры воды и, соответственно, профиля скорости звука в пограничном конвективном слое у поверхности ядерного топлива.

В связи с этим в качестве приближения поверхность ядерного топлива, обращенная к ультразвуковым датчикам, моделируется нагретой вертикальной пластиной. Выбор нагретой пластины объясняется, с одной стороны, близким ее подобием с теплофизической точки зрения поверхности ядерного топлива, а с другой – достаточно хорошей изученностью естественной конвекции у ее поверхности.

Таким образом, верификация математической модели, полученной для произвольного профиля температуры в конвективном пограничном слое у поверхности ядерного топлива, сводится к более простой задаче – верификации математической модели для нагретой вертикальной пластины. Следует отметить, что модель с нагретой вертикальной пластиной может иметь более широкое применение в промышленности в сравнении с конкретной задачей контроля формоизменения ядерного топлива.

Математическая модель акустического тракта

Ультразвуковой датчик, расположенный вблизи поверхности, распространяет ультразвуковые волны (УЗ-волны), которые, отражаясь от нее, возвращаются обратно в датчик. Вследствие естественной конвекции у поверхности нагретой пластины формируется пограничный тепловой слой. В пределах пограничного слоя температура среды изменяется от значения, равного температуре стенки $T_{ст}$, до температуры среды T_{∞} на большом расстоянии от пластины (рис. 1). Поскольку вдоль траектории распространения УЗ-волн существует градиент температур, то возникает изменение скорости звука, что приводит к изменению времени распространения УЗ-волн.

Дополнительно на результат измерения влияет неоднородность структуры среды в тепловом слое. Структура слоя изменяется по длине пластины и зависит от режима течения, характеризующегося числом Рэлея. На начальном участке пластины с постоянным тепловым потоком при $Ra < 3 \cdot 10^{12}$ образуется ламинарный пограничный слой, течение в котором имеет струйный характер. Выше по пластине происходит переход ламинарного течения в турбулентное. При $Ra > 4 \cdot 10^{13}$ у поверхности пластины развивается турбулентный режим, который сопровождается хаотическим пульсационным движением вихрей в пограничном слое. Неоднородности среды в виде турбулентных вихрей, масштаб которых меньше длины волны, приводят к рассеиванию волн. Если масштаб неоднородности значительно больше длины волны, то волна отклоняется в сторону. Таким образом, неравномерности потока в области турбулентного пограничного слоя приводят к возникновению флуктуации амплитуды эхо-сигналов по причине изменения условия отражения УЗ-волн от объекта.

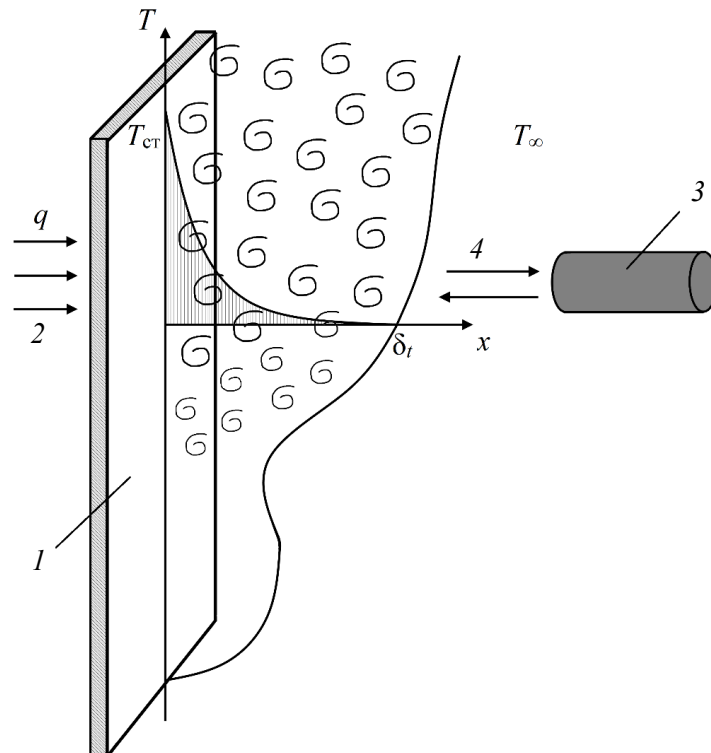


Рис. 1. Профиль температуры в пограничном слое у поверхности нагретой пластины:
1 – пластина; 2 – направление теплового потока; 3 – датчик;
4 – направления распространения ультразвуковых волн

Акустическое поле датчика разделяют на две зоны (рис. 2): ближнюю, в которой амплитуда сигнала постоянна, и дальнюю, в которой возникает нарушение синфазности, что сопровождается изменением амплитуды. Граница ближней зоны x_6 зависит от радиуса датчика R и длины волны λ :

$$x_6 = \frac{R^2}{\lambda}. \quad (1)$$

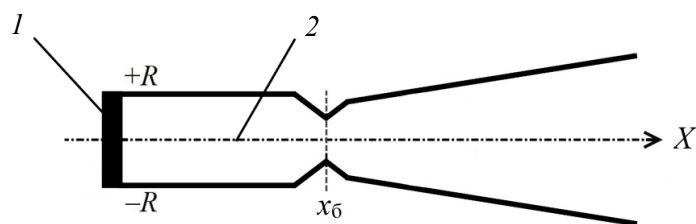


Рис. 2. Схема поля излучения ультразвукового датчика:
1 – датчик; 2 – акустическая ось датчика

В пределах ближней зоны распространение УЗ-волн соответствует законам геометрической оптики при выполнении условий применимости [8, 9]:

1. Размеры отражающей поверхности должны быть не меньше эллипса с полуосями:

$$a \geq \frac{1}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\lambda \cdot X}{1 + \cos 2\alpha}}; \quad (2)$$

$$b \geq \sqrt{\frac{\lambda \cdot X}{1 + \cos 2\alpha}}, \quad (3)$$

где X – расстояние от датчика до исследуемой поверхности; α – угол падения, град.

2. Отражающая поверхность может иметь неровности (шероховатости) размером H , если выполняется условие

$$2H \cdot \cos \alpha \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (4)$$

Математическая модель акустического тракта, разработанная авторами, описывает время распространения УЗ-волны в однородной среде от датчика до поверхности пластины и обратно в ближней зоне датчика в приближении геометрической акустики. Под однородностью среды подразумевается отсутствие турбулентных вихрей в пограничном слое вблизи поверхности пластины. Модель учитывает температурные изменения среды и связанную с этим рефракцию: искривление направления движения УЗ-волны.

Время распространения УЗ-волны в модели определяется как

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta\tau_A, \quad (5)$$

где τ_1 – время распространения УЗ-волны от датчика до пограничного слоя; τ_2 – время распространения УЗ-волны в пограничном слое; τ_3 – время распространения отраженной УЗ-волны после прохождения пограничного слоя; $\Delta\tau_A$ – время, обусловленное способом регистрации эхо-импульса по его переднему фронту на уровне порога A_0 .

Первые три слагаемых определяются исходя из траектории распространения УЗ-волн в среде. В среде, где температура постоянна и равна T_∞ , время прохождения УЗ-волны можно определить по формуле

$$\tau = \frac{L}{c(T_\infty)},$$

где L – пройденный УЗ-волной путь; $c(T_\infty)$ – значение скорости при температуре T_∞ .

При наклонном падении УЗ-волны на поверхность ее траектория в области пограничного слоя не будет прямолинейной (рис. 3). Тогда время распространения УЗ-волн в пограничном слое определяется исходя из известного распределения температуры в слое $T(x)$:

$$\tau = 2 \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x)) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_\infty)} c(T(x)) \right)^2}},$$

где δ_t – толщина теплового пограничного слоя.

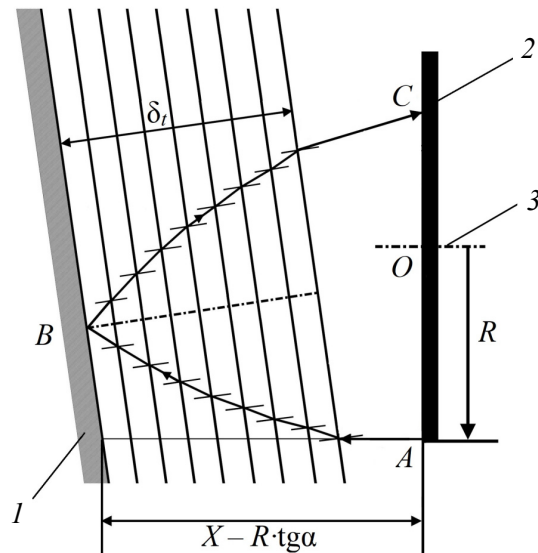


Рис. 3. Траектория распространения УЗ-волны до нагретой поверхности:
1 – пластина; 2 – датчик; 3 – акустическая ось; α – угол наклона поверхности

Поскольку время распространения УЗ-волны в среде измеряется автоматически по переднему фронту эхо-импульса, то временной интервал $\Delta\tau_A$ будет зависеть от уровня порога A_0 , по которому происходит измерение времени τ . На рис. 4 показано, что при увеличении уровня порога A_0 временной интервал $\Delta\tau_A$ будет увеличиваться.

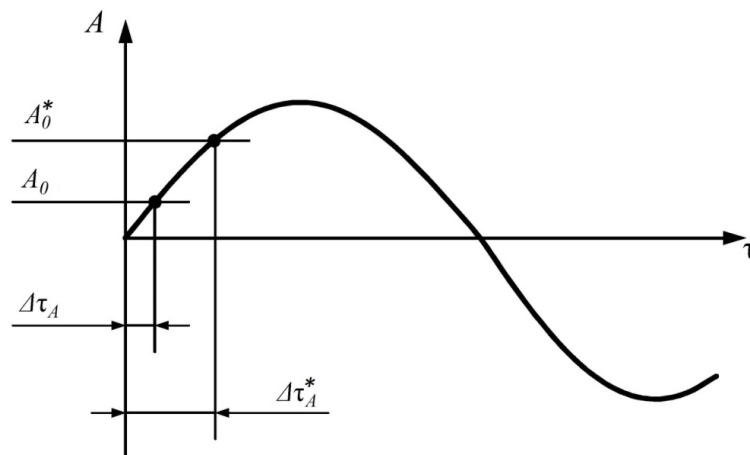


Рис. 4. Измерение времени прихода эхо-импульса

Передний фронт импульса формируется той частью пучка, которая проходит наименьшее расстояние от датчика до поверхности пластины. В приближении геометрической акустики наименьшее расстояние в случае наклонного падения волн на поверхность пройдет луч из точки A, находящийся на окружности датчика (рис. 3).

Тогда на основании математической модели время распространения УЗ-волны составит

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \Delta\tau_A = \\ &= \frac{X - R \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{\delta_t}{\cos \alpha}}{c(T_\infty)} \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos 2\alpha}\right) + 2 \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x)) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \\ &\quad + \frac{2 \sin^2 \alpha}{c(T_\infty)^2 \cos 2\alpha} \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{c(T(x)) dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{\sin \alpha}{c(T_\infty)} c(T(x))\right)^2}} + \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k), \end{aligned} \quad (6)$$

где f – частота волны; k – отношение амплитуды порога A_0 и максимальной амплитуды сигнала $A_{\max}$.

Если УЗ-волна падает нормально к исследуемой поверхности нагретой пластины ($\alpha = 0$), то выражение примет вид

$$\tau = 2 \cdot \frac{X - \delta_t}{c(T_\infty)} + 2 \cdot \int_0^{\delta_t} \frac{dx}{c(T(x))} + \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k). \quad (7)$$

В случае наклонного падения на поверхность ненагретой пластины ($T_{\text{ст}} = T_\infty$) выражение (6) упростится:

$$\tau = \frac{X - R \cdot \operatorname{tg} \alpha}{c(T_\infty)} \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos 2\alpha}\right) + \frac{1}{2\pi f} \cdot \arcsin(k). \quad (8)$$

Сравнение расчетных и экспериментальных данных

В соответствии с разработанной математической моделью акустического тракта метода измерения расстояний от ультразвукового датчика до поверхности пластины на результат измерения времени распространения ультразвуковых волн влияют три группы факторов: наличие естественной конвекции у поверхности нагретой пластины; наклонное падение ультразвуковых волн на поверхность пластины и изменение амплитуды принятых сигналов.

Концепция экспериментальной проверки математической модели акустического тракта метода заключается в натурном моделировании каждой группы факторов по отдельности. Таким образом, моделировались следующие условия:

- влияние естественной конвекции на время распространения ультразвуковых волн при перпендикулярном направлении акустической оси датчика к поверхности пластины;
- наклонное падение ультразвуковых волн на поверхность пластины при отсутствии естественной конвекции;
- изменение амплитуды принятого датчиком сигнала относительно величины порога отсчета времени распространения волн по переднему фронту эхо-импульса.

Результаты экспериментальных исследований влияния естественной конвекции на измерения линейных размеров в воде ультразвуковым эхо-

импульсным методом изложены в работе [10]. Эксперименты проводились в бассейне с водой (размеры $5 \times 3 \times 10$ м), в котором вертикально располагался электрообогреваемый цилиндр диаметром 74 мм и высотой 1700 мм. Естественная конвекция возникала у поверхности электрообогреваемого цилиндра при его нагреве. Конструкция цилиндра обеспечивала постоянное по его высоте значение плотности теплового потока и позволяла ее регулировать в диапазоне от 0 до $7,00 \text{ кВт/м}^2$.

Ультразвуковой датчик, работающий в эхо-импульсном режиме, располагался на расстоянии ~ 80 мм от поверхности цилиндра, акустическая ось датчика была перпендикулярна образующей цилиндра. Датчик устанавливался на трех разных высотных отметках относительно торца цилиндра, равных 295; 855 и 1415 мм. В датчике использовался доскообразный пьезоэлемент из пьезокерамики ЦТС-19 с резонансной частотой 5 МГц. Эксперименты проводились на ненагретом цилиндре и нагретом с плотностью теплового потока, равной 1,25; 2,80; 5,00 и $7,00 \text{ кВт/м}^2$.

Схема проведения экспериментов заключалась в следующем:

- ультразвуковой датчик устанавливали на одной из трех обозначенных выше высотных отметок;
- измеряли время распространения ультразвуковых волн от датчика до ненагретого цилиндра и вычисляли соответствующее расстояние между ними;
- подавали электрическое напряжение на электрообогреваемый цилиндр и устанавливали плотность теплового потока равной $1,25 \text{ кВт/м}^2$;
- измеряли время распространения волн и вычисляли расстояние от датчика до цилиндра;
- устанавливали плотность теплового потока, равную $2,80 \text{ кВт/м}^2$ и т.д.;
- затем датчик устанавливали на следующую высотную отметку и повторяли всю вышеописанную последовательность действий.

При неизменном расстоянии от датчика до поверхности цилиндра во время его разогрева при плотности теплового потока от 1,25 до $7,00 \text{ кВт/м}^2$ устанавливаются определенные параметры естественной конвекции вдоль траектории распространения ультразвуковых волн, которые можно охарактеризовать шириной конвективного слоя и профилем осредненной по времени температуры воды в этом слое. При этом время распространения волн (среднее значение из временной выборки сигналов) с повышением плотности теплового потока будет уменьшаться и соответственно будет уменьшаться измеренное расстояние от датчика до поверхности цилиндра.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные для двух серий экспериментов на высотных отметках 855 и 1415 мм. Первая серия экспериментов (на отметке 855 мм) соответствовала окончанию переходной области от ламинарного к турбулентному режиму естественной конвекции ($Ra \approx 2 \dots 4 \cdot 10^{13}$). Вторая серия (на отметке 1415 мм) соответствовала полностью установившейся развитой турбулентной конвекции с $Ra > 10^{14}$. На рис. 5 по оси ординат отложена величина ΔX уменьшения значения измеренного расстояния от датчика до поверхности цилиндра относительно расстояния до ненагретого цилиндра.

С помощью разработанной математической модели акустического тракта метода было выполнено численное моделирование проведенных экспериментов. Расчет профиля температуры в конвективном слое выполнялся

для плоской вертикальной пластины с постоянной плотностью теплового потока. Выбор пластины в качестве тела, вдоль поверхности которого моделировалась конвекция, объясняется несколькими причинами.

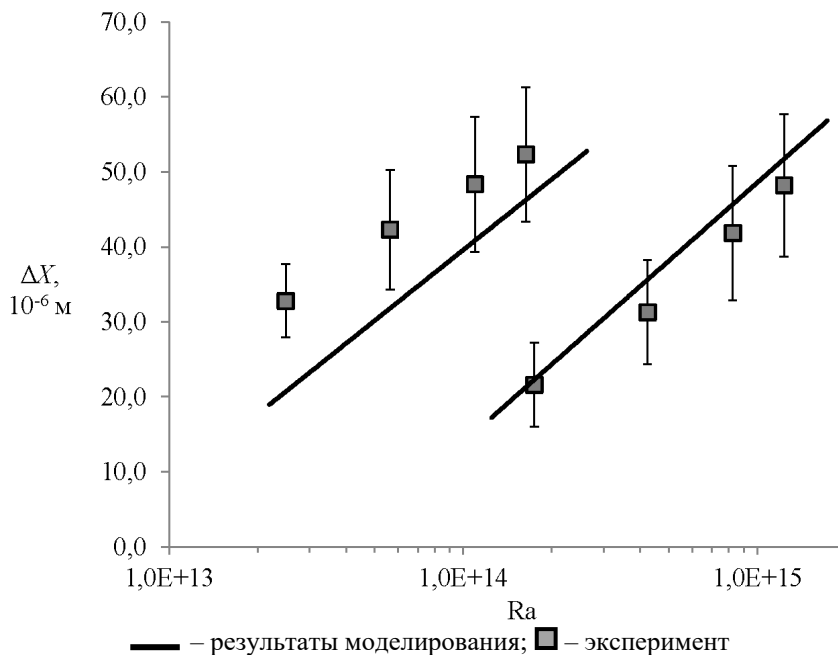


Рис. 5. Зависимость погрешности измерений при наличии естественной конвекции

Во-первых, для плоской пластины существует значительный объем опубликованных результатов расчетно-экспериментальных исследований естественной конвекции [11–13]. Во-вторых, плоская пластина рассматривается как наиболее простая и в то же время наиболее распространенная в практике элементарная поверхность контролируемых ультразвуковым методом объектов. В-третьих, плоскую пластину можно рассматривать при описании естественной конвекции как первое приближение к поверхности цилиндра, с помощью которого выполнялись вышеперечисленные эксперименты.

Для плоской вертикальной пластины с постоянной плотностью теплового потока q профили температуры $T(x)$ рассчитываются следующим образом [12]:

$$T(x) = \Delta T \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{12\delta_h} \right)^{1/15} \right) + T_V, \text{ при } \frac{x}{h} > 1,6, \quad (9)$$

$$T(x) = \Delta T \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{4\delta_h} \right)^{1/7} \right) + T_V, \text{ при } \frac{x}{h} \leq 1,6, \quad (10)$$

где $\Delta T = \frac{qy}{N_y \lambda}$; y – координата по высоте пластины от нижнего торца; x – координата вдоль нормали к поверхности пластины; T_∞ – температура воды

вдали от пластины; Nu_y – число Нуссельта, $Nu_y = 0,568 \cdot (Ra_y)^{0,22}$; h – толщина потери энергии в тепловом пограничном слое: $h = 2,16 \cdot Nu_y^{-1} \cdot y$.

Толщина пограничного слоя δ_t для турбулентного режима определяется расстоянием от поверхности x_δ ($x_\delta = \delta_t$), при котором температура воды составляет 99 % от температуры внешнего потока:

$$\frac{T_s - T(x_\delta)}{T_s - T_\infty} = 0,99, \quad (11)$$

где T_s – температура стенки, °С.

Используя выражения для профиля температуры воды и программу расчета скорости звука в воде в условиях естественной конвекции [14], рассчитали по математической модели изменения времени распространения ультразвуковых волн от датчика до нагретой вертикальной пластины в зависимости от числа Рэлея, которые показаны на рис. 5 сплошными линиями. Результаты расчета хорошо совпадают с экспериментальными данными, особенно для режима развитой турбулентности с $Ra > 10^{14}$ (см. рис. 5).

Экспериментальные исследования акустического тракта метода при наклонном падении ультразвуковых волн на плоскую поверхность проводились следующим образом. В экспериментах использовались несколько датчиков с дисковым пьезоэлементом диаметром 18 мм и резонансной частотой $f_p = 5$ МГц. Отражающая ультразвуковые волны плоская пластина устанавливалась в ближней зоне акустического поля датчиков на расстоянии ~ 110 мм. Угол падения волн на поверхность пластины изменялся в диапазоне от 0° до 3° . При угле, большем чем 3° , часть ультразвукового луча после отражения не попадает на пьезоэлемент датчика и амплитуда принятого сигнала резко уменьшается.

Пластина с помощью микрометрического столика перемещалась относительно своего исходного положения на 3; 6; 9 и 12 мм. При этом измерялось приращение расстояния и сравнивалось с величиной перемещения микрометрического столика. Проведенные эксперименты обсчитывались по математической модели акустического тракта метода. Результаты расчетов и экспериментов приведены на рис. 6.

Анализируя рис. 6, можно отметить следующее. Все экспериментальные значения лежат выше расчетных, причем с увеличением приращения расстояния ΔX между датчиком и пластиной разница между экспериментом и расчетом увеличивается. Тем не менее характер увеличения погрешности измерения приращения расстояния от датчика до пластины с увеличением угла падения волн на пластину совпадает с соответствующей расчетной закономерностью. Таким образом, расчетные значения, представленные на рис. 6, можно рассматривать как хорошее приближение «снизу» к полученным экспериментальным значениям.

Экспериментальные исследования влияния величины порога отсчета времени распространения ультразвуковых волн по переднему фронту принятого сигнала проводились путем изменения величины порога относительно максимальной амплитуды первой полуволны сигнала. Изменение величины порога относительно максимальной амплитуды первой полуволны может

привести к изменению измеренного расстояния не более одной восьмой длины волны, что для ультразвуковых волн с частотой 5 МГц в воде составляет ~ 38 мкм. На рис. 7 приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных по модели приращений измеренных расстояний в зависимости от отношения величины порога к амплитуде первой полуволны сигнала. Результаты эксперимента достаточно хорошо совпадают с расчетными значениями, особенно в области $A_0/A_{\max} < 0,5$, которая обычно используется в измерениях на практике.

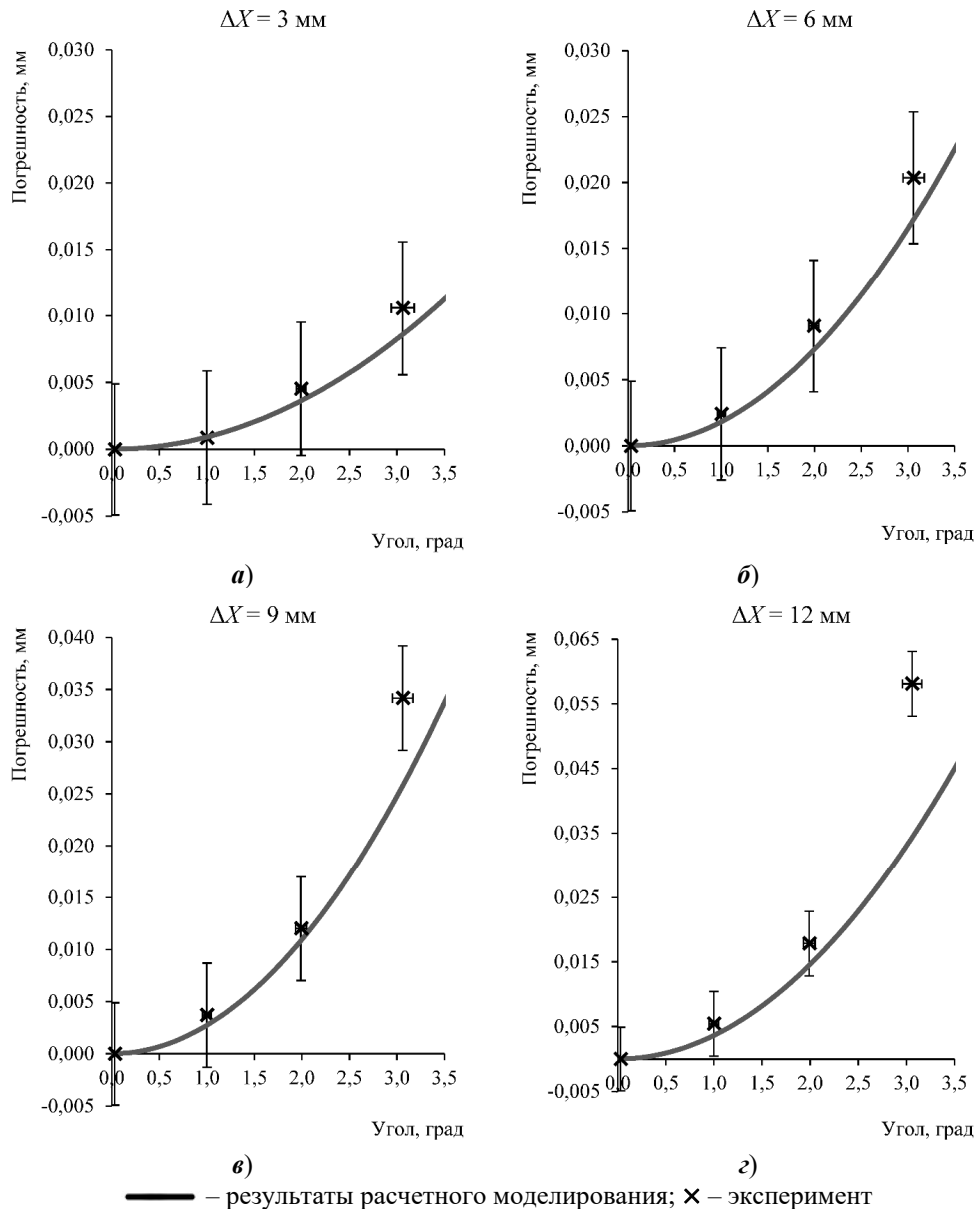
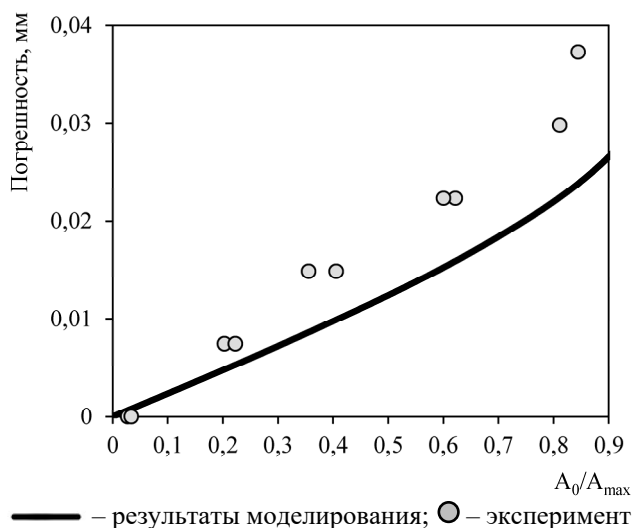


Рис. 6. Зависимость погрешности измерений от угла наклона пластины для различных значений ΔX : а – 3 мм; б – 6 мм; в – 9 мм; г – 12 мм

Рис. 7. Зависимость погрешности от амплитуды порога A_0

Заключение

Математическая модель акустического тракта ультразвукового эхо-импульсного метода измерения расстояний от датчика до отражающей волны поверхности, разработанная в приближении геометрической акустики и в представлении конвективного слоя у нагретой вертикальной плоской поверхности в виде плоскопараллельной слоистой водной системы с монотонно убывающим от поверхности профилем температуры воды, удовлетворительно описывает время распространения ультразвуковых волн в воде от датчика до вертикальной нагретой плоской пластины и обратно.

Показано, что для естественной конвекции в воде у вертикальной нагретой плоской поверхности с числами Рэлея от $2,3 \cdot 10^{13}$ до $1,3 \cdot 10^{15}$ распространение ультразвуковых волн с частотой 5 МГц в первом приближении можно рассматривать как распространение в слоистой параллельной поверхности нагрева водной системе с монотонно убывающим от поверхности профилем температуры, совпадающим с профилем осредненной по времени температуры воды в конвективном слое.

Распространение волн в ламинарном конвективном слое ($Ra < 3 \cdot 10^{12}$) можно также рассматривать как распространение в слоистой плоскопараллельной водной системе с профилем температуры, равным профилю температуры в ламинарном слое.

Разработанная математическая модель может использоваться при разработке ультразвуковых эхо-импульсных измерительных систем, основанных на измерении времени распространения ультразвуковых волн в жидкости, при естественной конвекции вдоль вертикальных нагретых поверхностей, до которых измеряется расстояние.

Список литературы

1. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля. М. : Машиностроение, 1981. 240 с.
2. Королев М. В. Эхо-импульсные толщиномеры. М. : Машиностроение, 1980. 114 с.
3. Горбатов А. А., Рудашевский Г. Е. Акустические методы измерения расстояний и управления. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Энергоиздат, 1981. 207 с.

4. Xu Yuanhuan, Nie Yong Distortion. Measurement for Fuel Assemblies with Ultrasonic Technique // *Post-Irradiation Examination and In-Pile Measurement Techniques for Water Reactor Fuels*. Vienna: IAEA, 2009. IAEA-TECDOC-CD-1635.
5. Павлов С. В. Неразрушающие ультразвуковые методы исследований облучённого топлива ядерных реакторов. Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013. 256 с.
6. Гапшис А. А., Каспарайтис А. Ю., Модестов М. Б. [и др.]. Координатные измерительные машины и их применение. М. : Машиностроение, 1988. 328 с.
7. Воронина А. В., Павлов С. В. Математическая модель акустического тракта эхо-импульсного метода измерения геометрических параметров тепловыделяющей сборки ядерного реактора в приближении геометрической акустики // *Вестник НИЯУ «МИФИ»*. 2020. Т. 9, № 3. С. 217–225. doi:10.1134/S2304487X20030104
8. Выборнов Б. И. Ультразвуковая дефектоскопия. М. : Металлургия, 1985. 256 с.
9. Свердлин Г. М. Прикладная гидроакустика. Л. : Судостроение, 1976. 280 с.
10. Павлов С. В., Шалагинова Т. М., Михайлов С. В., Прокуданов Д. Л. Исследование влияния естественной конвекции на результаты измерения геометрических характеристик твэлов и тепловыделяющих сборок ультразвуковыми методами в условиях бассейнов выдержки : препринт. Димитровград : НИИАР, 1991. 28 с.
11. Lock G. S. H., F. J. de B. Trotter Observations on the structure of a turbulent free convection boundary layer // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1968. Vol. 11. P. 1225–1232. doi:10.1016/0017-9310(68)90193-2
12. Vliet G. C., Liv C. K. An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers // *Journal of Heat Transfer*. 1969. Vol. 92. P. 517–531. doi:10.1115/1.3580236
13. Qureshi Z. H., Gebhart B. Transition and transport in a buoyancy driven flow in water adjacent to a vertical uniform flux surface // *Int. J. Heat Mass Transform.* 1978. Vol. 21. P. 1467–1479. doi:10.1016/0017-9310(78)90003-0
14. Воронина А. В., Павлов С. В. Методика и программа расчета скорости звука в воде в условиях естественной конвекции у поверхности тепловыделяющих сборок ядерных реакторов // *Вестник национального исследовательского ядерного университета МИФИ*. 2019. Т. 8, № 5. С. 465–472. doi:10.1134/S2304487X19050080

References

1. Ermolov I.N. *Teoriya i praktika ul'trazvukovogo kontrolya = Theory and practice of ultrasonic testing*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981:240. (In Russ.)
2. Korolev M.V. *Ekho-impul'snye tolshchinomery = Pulse and echo thickness gauges*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1980:114. (In Russ.)
3. Gorbатов А.А., Рудашевский Г.Е. *Akusticheskie metody izmereniya rasstoyaniy i upravleniya. 2-e izd., pererab. i dop. = Acoustic distance measurement and control methods. The 2nd edition, revised and supplemented*. Moscow: Energoizdat, 1981:207. (In Russ.)
4. Xu Yuanhuan, Nie Yong Distortion. Measurement for Fuel Assemblies with Ultrasonic Technique. *Post-Irradiation Examination and In-Pile Measurement Techniques for Water Reactor Fuels*. Vienna: IAEA, 2009. IAEA-TECDOC-CD-1635.
5. Pavlov S.V. *Nerazrushayushchie ul'trazvukovye metody issledovaniy obluchennogo topliva yadernykh reaktorov = Non-destructive ultrasonic methods for studying irradiated fuel of nuclear reactors*. Dimitrovgrad: ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013:256. (In Russ.)
6. Gapshis A.A., Kasparaytis A.Yu., Modestov M.B. [et al.]. *Koordinatnye izmeritel'nye mashiny i ikh primeneniye = Coordinate measuring machines and their applications*. Moscow: Mashinostroyeniye, 1988:328. (In Russ.)
7. Voronina A.V., Pavlov S.V. Mathematical model of the acoustic path of the pulse-echo method for measuring the geometric parameters of the fuel assembly of a nuclear reactor in the approximation of geometric acoustics. *Vestnik NIYaU «MIFI» = Bulletin of*

- National Research Nuclear University MPhI*. 2020;9(3):217–225. (In Russ.). doi:10.1134/S2304487X20030104
8. Vybornov B.I. *Ul'trazvukovaya defektoskopiya = Ultrasonic flaw detection*. Moscow: Metallurgiya, 1985:256. (In Russ.)
 9. Sverdlin G.M. *Prikladnaya gidroakustika = Applied hydroacoustics*. Leningrad: Sudostroenie, 1976:280. (In Russ.)
 10. Pavlov S.V., Shalaginova T.M., Mikhaylov S.V., Prokudanov D.L. *Issledovanie vliyaniya estestvennoy konveksii na rezul'taty izmereniya geometricheskikh kharakteristik tvelov i teplovydelyayushchikh sborok ul'trazvukovymi metodami v usloviyakh basseyinov vyderzhki: preprint = Studying the influence of natural convection on the results of measuring the geometric characteristics of fuel rods and fuel assemblies by ultrasonic methods under conditions of pool holding: preprint*. Dimitrovgrad: NIIAR, 1991:28. (In Russ.)
 11. Lock G.S.H., F.J. de B. Trotter Observations on the structure of a turbulent free convection boundary layer. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1968;11:1225–1232. doi:10.1016/0017-9310(68)90193-2
 12. Vliet G.C., Liv C.K. An Experimental Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers. *Journal of Heat Transfer*. 1969;92:517–531. doi:10.1115/1.3580236
 13. Qureshi Z.H., Gebhart V. Transition and transport in a buoyancy driven flow in water adjacent to a vertical uniform flux surface. *Int. J. Heat Mass Transform.* 1978;21:1467–1479. doi:10.1016/0017-9310(78)90003-0
 14. Voronina A.V., Pavlov S.V. Method and program for calculating the speed of sound in water under conditions of natural convection at the surface of fuel assemblies of nuclear reactors. *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta MIFI = Bulletin of National Research Nuclear University MPhI*. 2019;8(5):465–472. (In Russ.). doi:10.1134/S2304487X19050080

Информация об авторах / Information about the authors

Александра Владимировна Воронина

аспирант, старший преподаватель, кафедра ядерных реакторов и материалов, Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ» (Россия, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294)

E-mail: AVVoronina@mephi.ru

Aleksandra V. Voronina

Postgraduate student, senior lecturer, sub-department of nuclear reactors and materials, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute – branch of National Research Nuclear University MPhI (294 Kuibysheva street, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia)

Сергей Владленович Павлов

доктор технических наук, доцент, заведующий базовой кафедрой при ООО НПФ «СОСНЫ», Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал НИЯУ «МИФИ» (Россия, Ульяновская обл., г. Димитровград, ул. Куйбышева, 294)

E-mail: pavlov@sosny.ru

Sergey V. Pavlov

Doctor of engineering sciences, associate professor, head of the base sub-department at LLC NPF “Sosny”, Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute – branch of National Research Nuclear University MPhI (294 Kuibysheva street, Dimitrovgrad, Ulyanovsk region, Russia)

Поступила в редакцию / Received 09.11.2020

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 20.12.2020

Принята к публикации / Accepted 15.01.2021

УДК 681.2.084

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-7

Измерительная система линейных перемещений на базе электромагнитного фазовращателя

О. К. Абдирашев

Евразийский национальный университет имени Л. Н. Гумилева,
Нур-Султан, Республика Казахстан

omeke_92@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В основу принципа действия автоматизированных систем управления и контроля положено широкое использование устройств измерения угловых и линейных перемещений. При этом основным требованием, предъявляемым к этим устройствам, является высокая надежность, безопасность и свойства выходного сигнала, удобные для дальнейшего использования. Как правило, выходной сигнал устройств измерения параметров линейных и угловых перемещений должен на современном уровне развития быть в цифровой форме. При этом актуальной задачей является обеспечение высокой точности перемещений в измерительных преобразователях и преобразование исходной величины в электрический сигнал. Именно электрическая форма выходного сигнала первичного измерительного преобразователя наиболее удобна для дальнейшей обработки и использования в последующих каскадах робототехнических систем и комплексов. Целью работы является разработка измерительных преобразователей на основе электромагнитных фазовращателей угловых перемещений на базе неоднородного магнитопровода с распределенными параметрами. *Материалы и методы.* Исследованы процессы, протекающие при работе электромагнитного преобразователя с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами, реализующего функции линейного фазовращателя. *Результаты.* Разработана методика и математическая модель. Методика позволяет вычислить абсолютную погрешность от воздействия какого-либо фактора. Результирующая дисперсия от действия всех факторов будет зависеть не только от дисперсии каждого фактора, но будет являться результатом взаимодействия этих факторов. С помощью математической модели проведены исследования разработанной измерительной системы с целью получения разложения абсолютных погрешностей системы на составляющие по осям многомерного пространства. *Выводы.* Полученные результаты исследований заключаются в использовании методики проектирования измерительных систем линейных перемещений для получения допусков на изготовление отдельных элементов электромагнитной системы и формировании требований к характеристикам блоков измерительной системы на основе полученной математической модели.

Ключевые слова: измерительный преобразователь, электромагнитный фазовращатель, неоднородный магнитопровод, распределенные параметры

Для цитирования: Абдирашев О. К. Измерительная система линейных перемещений на базе электромагнитного фазовращателя // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 77–86. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-7

Linear displacement measuring system based on electromagnetic phase shifter

© Абдирашев О. К., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

O.K. Abdirashev

Eurasian National University named after L.N. Gumilyov,
Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan

omeke_92@mail.ru

Abstract. *Background.* The principle of automated control and monitoring systems' operation is based on the widespread use of devices for measuring angular and linear displacement. At the same time, the main requirement for these devices is high reliability, safety and properties of the output signal, convenient for further use. As a rule, the output signal of devices for measuring the parameters of linear and angular displacements should be in digital form at the present level of development. At the same time, the urgent task is to ensure high accuracy of movements in the measuring transducers and the conversion of the initial value into an electrical signal. Electrical form of the output signal of the primary measuring transducer is most convenient for further processing and use in subsequent stages of robotic systems and complexes. The purpose of the work is to develop measuring transducers based on electromagnetic phase shifters of angular displacements based on a non-uniform magnetic circuit with distributed parameters. *Materials and methods.* Research of the processes occurring during the operation of an electromagnetic converter with a non-uniform magnetic circuit with distributed parameters, which implements the functions of a linear phase shifter. *Results.* A methodology and mathematical model have been developed. The technique allows you to calculate the absolute error from the influence of any factor. The resulting variance from the action of all factors will depend not only on the variance of each factor, but will be the result of the interaction of these factors. With the help of a mathematical model, studies of the developed measuring system were carried out in order to obtain a decomposition of the absolute errors of the system into components along the axes of a multi-dimensional space. *Conclusions.* The obtained research results consist in the use of the methodology for the design of measuring systems of linear displacements to obtain tolerances for the manufacture of individual elements of the electromagnetic system and the formation of requirements for the characteristics of the measuring system blocks based on the obtained mathematical model.

Keywords: measuring transducer, electromagnetic phase shifter, inhomogeneous magnetic circuit, distributed parameters

For citation: Abdirashev O.K. Linear displacement measuring system based on electromagnetic phase shifter. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;2:77–86. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-7

Введение

Для разработки измерительных преобразователей параметров механических перемещений в электрические сигналы используются различные физические явления, среди которых самым распространенным является использование взаимного влияния обмоток через переменное электромагнитное поле. Такие измерительные преобразователи получили название электромагнитных преобразователей. Измерительные электромагнитные преобразователи параметров механических перемещений в основном используют эффект изменения взаимной электромагнитной связи при взаимном механическом смещении обмоток [1]. В качестве информационного признака выходного электрического сигнала в этом случае может быть использована амплитуда выходного сигнала, его частота или изменение начальной фазы выходного напряжения.

Наибольшее распространение получили электромагнитные измерительные преобразователи угловых перемещений. Это так называемые поворотные трансформаторы. Принцип действия поворотных трансформаторов основан на использовании изменения взаимной индуктивной связи между обмотками, расположенными на статоре и на роторе [2]. В качестве информационного признака выходного сигнала используется изменение начальной фазы выходного напряжения обмоток ротора. Измерительные поворотные трансформаторы, в качестве информационного признака выходного сигнала которых используется изменение начальной фазы выходного напряжения, получили название «электромагнитные фазовращатели» (ЭМФ).

Конструкция измерительного фазовращателя на базе неоднородного магнитопровода с распределенными параметрами

Существующие электромагнитные измерительные преобразователи, сконструированные на основе электромагнитной системы с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами, не обладают устойчивостью к вибрационным воздействиям [3]. Для достижения нужных технических характеристик была разработана конструкция электромагнитного преобразователя с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами, реализующего функции линейного фазовращателя.

Под электромагнитной системой с распределенными параметрами понимается совокупность магнитопровода и обмоток, электромагнитные характеристики которых зависят от распределения параметров этих элементов в пространстве.

Автором разработана конструкция электромагнитного фазовращателя линейных перемещений на базе электромагнитной системы с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами. Конструкция электромагнитного преобразователя линейных перемещений представлена на рис. 1.

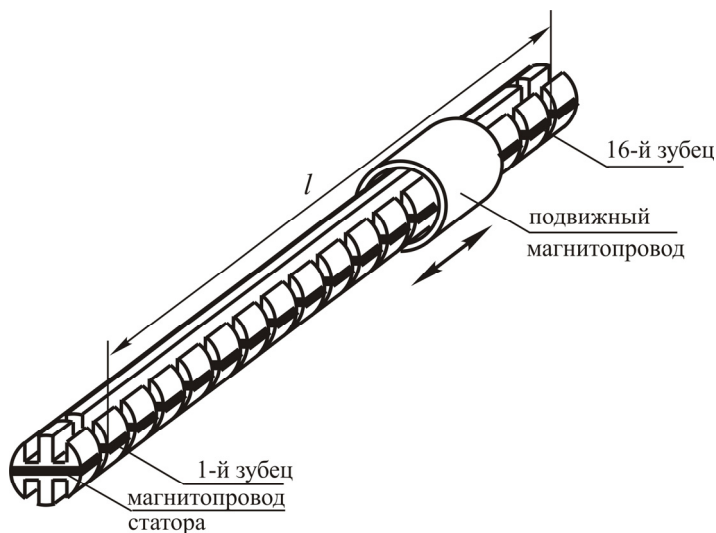


Рис. 1. Конструкция электромагнитного фазовращателя

Информационная линейка датчика имеет цилиндрическую форму и состоит из трех частей. Верхний и нижний каркасы представляют собой разре-

занный по продольной оси цилиндр, изготовленный из немагнитного материала, с пазами для размещения обмотки. Между ними располагается магнитопровод статора, который состоит из нескольких пластин электротехнической стали.

Информационная линейка помещена во внутреннюю полость сплошного кольца из ферромагнитного материала – подвижного магнитопровода. Подвижный магнитопровод перемещается по поверхности неподвижной информационной линейки. Форма магнитопровода статора представлена на рис. 2



Рис. 2. Информационная линейка

В верхний и нижний пазы каркаса фазовращателя слева уложена обмотка, количество витков которой W_p одинаково по всей длине информационной линейки. Эта обмотка получила название «равномерная». В правые пазы статора уложены «синусная» и «косинусная» обмотки.

Число витков «синусной» обмотки в зависимости от номера участка или зубца статора определяется по следующей формуле:

$$W_{sk} = W_m \sin\left(\frac{2\pi}{n}(k - 0,5)\right),$$

где W_{sk} – количество витков синусной обмотки на участке k ; n – количество активных участков информационной линейки; W_m – максимальное количество витков обмотки, которое зависит от размеров паза и диаметра провода; k – номер участка.

Аналогичным образом определяется число витков «косинусной» обмотки в зависимости от номера участка или зубца статора:

$$W_{ck} = W_m \sin\left(\frac{2\pi}{n}(k - 0,5)\right),$$

где W_{ck} – количество витков косинусной обмотки на участке k .

Ранее уже рассматривалась конструкция электромагнитной системы с неоднородным магнитопроводом с распределенными параметрами. Принцип действия фазовращателя основан на изменении электромагнитного взаимодействия обмоток при изменении положения элемента, вносящего неоднородность удельного магнитного сопротивления распределенного магнитопровода. В качестве элемента, вносящего неоднородность, используется кольцевой магнитопровод.

Измерительная система линейных перемещений на базе электромагнитного фазовращателя

Как и классический фазовращатель, рассматриваемый электромагнитный преобразователь может работать в двух режимах. В первом случае для питания обмоток преобразователя необходим источник двухфазного переменного тока, выходные токи которого равны по величине и сдвинуты по фазе на 90° . Токи источника осуществляют в этом случае питание синусной и

косинусной обмоток. В электромагнитном преобразователе образуется бегущее магнитное поле. На зажимах равномерно распределенной обмотки получим напряжение с постоянной амплитудой и начальной фазой, изменяющейся пропорционально расстоянию от начала информационной линейки до середины подвижного магнитопровода. Однако разработка двухфазного источника тока с высокостабильными характеристиками довольно сложна, поэтому для питания измерительного преобразователя используется обычный источник переменного напряжения. Такой режим работы измерительного преобразователя называют однофазным режимом.

В однофазном режиме работы измерительного преобразователя магнитное поле датчика является пульсирующим. Пульсирующее магнитное поле наведет в синусной и косинусной обмотках электродвижущие силы с амплитудами, зависящими от положения подвижного магнитопровода на информационной линейке. Структурная схема измерительной системы линейных перемещений с электромагнитным преобразователем, работающим в однофазном режиме, представлена на рис. 3.

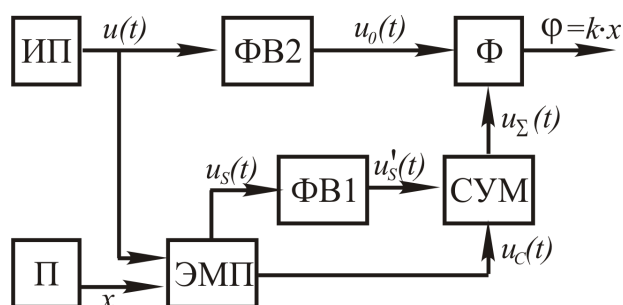


Рис. 3. Структурная схема измерительной системы линейных перемещений с электромагнитным преобразователем

Измерительная система состоит из источника питания ИП, электромагнитного измерительного преобразователя ЭМП, электронного фазовращателя ФВ1, сумматора двух напряжений СУМ, электронного фазовращателя опорного напряжения ФВ2 и фазометра. Положение подвижного магнитопровода на информационной линейке представлено блоком П.

Методы разработки измерительной системы, обладающей заданными метрологическими характеристиками

Один из возможных методов разработки для формирования требований к свойствам каждого элемента измерительной системы, обладающей заданными метрологическими характеристиками, заключается в анализе статистических данных [4], полученных путем изучения свойств элементов готовых изделий. Для статистического анализа необходимо иметь большое количество готовых изделий. Это требует больших материальных затрат.

Второй возможный путь получения рекомендаций по проектированию измерительных систем линейных перемещений лежит в анализе функции преобразования. Однако функция преобразования не учитывает влияние ряда факторов на погрешность измерительной системы. Это обусловлено тем, что функция преобразования получена путем теоретического анализа измери-

тельной системы с идеализированным электромагнитным преобразователем, в котором не учитывается дискретное распределение магнитных свойств измерительной линейки, дискретное распределение числа витков обмотки и других влияющих факторов.

Лучшее решение поставленной задачи заключается в использовании компьютерной математической модели для полного анализа метрологических характеристик системы. Использование компьютерной модели позволяет провести исследование метрологических свойств системы как при воздействии на нее отдельных факторов, так при одновременном воздействии на нее совокупности факторов. Компьютерная модель составлена не по формулам, полученным теоретическим путем идеализации конструкции электромагнитного преобразователя и характеристик других блоков устройства. Компьютерное моделирование дает возможность учесть воздействие на характеристику измерительной системы абсолютного большинства факторов.

Результаты исследования измерительной системы, представленные ранее, показали, что в большинстве случаев абсолютные погрешности однофакторных воздействий изменяются в функции измеряемого перемещения по периодическому закону. Воздействие некоторых факторов приводит к появлению абсолютных погрешностей, изменяющихся по линейному закону в функции перемещения. Окно значений погрешности ограничено значениями перемещений от нуля до предела измерений. В этом случае и линейное изменение погрешности в функции измеряемого перемещения можно рассматривать как периодический закон с периодом, равным пределу измерения. Это обстоятельство положено в основу последующих исследований.

Цель последующих исследований заключается в использовании методики проектирования измерительных систем линейных перемещений для получения допусков на изготовление отдельных элементов электромагнитной системы и формировании требований к характеристикам блоков измерительной системы. Речь идет о требованиях к точности изготовления информационной линейки, о выборе максимального расчетного количества витков обмоток, о точности изготовления подвижного магнитопровода. Важной стороной проектирования является формирование требований к характеристикам отдельных блоков измерительной системы. К ним относятся неравенство максимальных значений напряжений синусной и косинусной обмотках на входе сумматора, погрешность фазовращателя, стабильность частоты генератора измерительной системы и отсутствие балансировки электрических параметров цепей синусной и косинусной обмоток.

Многомерное пространство и взаимодействие факторов

Из курса математики известно, что система функций, состоящая из бесконечного числа членов следующего вида:

$$\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}}, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos(2 \cdot x),$$

$$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(2 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos(3 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(3 \cdot x), \dots,$$

является полной ортонормированной системой. Отсюда следует, что при приближении функции тригонометрическим многочленом

$$s_n(x) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k \cdot \cos(k \cdot x) + \beta_k \cdot \sin(k \cdot x))$$

среднеквадратичная погрешность $\delta^2 = \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) - s_n(x))^2 \cdot dx$ минимальна

тогда и только тогда, когда в качестве α_k и β_k выбраны так называемые коэффициенты Фурье, которые определяются следующим образом:

$$\alpha_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) \cdot \cos(kx)) \cdot dx \text{ и } \beta_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) \cdot \sin(kx)) \cdot dx ,$$

где $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

Эту ортонормированную систему предлагается использовать для анализа систематической погрешности измерительной системы. В общем случае разложение функции в ряд Фурье записывается в следующем виде:

$$\begin{aligned} f(x) = & A_0 + A'_{1m} \cos(kx) + A''_{1m} \sin(kx) + A'_{2m} \cos(2kx) + \\ & + A''_{2m} \sin(2kx) + A'_{3m} \cos(3kx) + A''_{3m} \sin(3kx) + A'_{4m} \cos(4kx) + \\ & + A''_{4m} \sin(4kx) + A'_{5m} \cos(5kx) + A''_{5m} \sin(5kx) + \dots \end{aligned}$$

Обозначим: $A_1 = \frac{A'_{1m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение косинусной составляющей основной гармоники функции; $A_2 = \frac{A''_{1m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение синусной составляющей основной гармоники функции; $A_3 = \frac{A'_{2m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение косинусной составляющей второй гармоники функции; $A_4 = \frac{A''_{2m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение синусной составляющей второй гармоники функции; $A_5 = \frac{A'_{3m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение косинусной составляющей третьей гармоники функции; $A_6 = \frac{A''_{3m}}{\sqrt{2}}$ – действующее значение синусной составляющей третьей гармоники функции и т.д.

Квадрат действующего значения функции равен сумме квадратов действующих значений слагаемых, поэтому

$$A^2 = A_0^2 + A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + A_6^2 + A_7^2 + A_8^2 + \dots$$

При определении погрешности измерений используют среднеквадратическое отклонение значений от прямой линии, уравнение которой записывается следующим образом:

$$y(x) = cx + d ,$$

где c – постоянная величина, определяющая угол наклона прямой к оси x ; d – аддитивная составляющая погрешности.

Следовательно, дисперсия функции определяется полностью только составляющими $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, \dots$ или

$$D = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + A_5^2 + A_6^2 + A_7^2 + A_8^2 + \dots$$

Составляющие $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, \dots$ можно считать координатами по осям многомерного пространства с номерами 1, 2, 3, ..., n .

Таким образом, абсолютную погрешность, которая является результатом воздействия какого-либо фактора, предлагается разложить по осям многомерного пространства. Результирующая дисперсия от действия всех факторов будет зависеть не только от дисперсии каждого фактора, но будет являться результатом взаимодействия этих факторов.

Таким образом, для анализа погрешности достаточно получить коэффициенты Фурье.

С помощью математической модели проведены исследования разработанной измерительной системы с целью получения разложения абсолютных погрешностей системы на составляющие по осям многомерного пространства. По вертикальной оси откладываются амплитуды составляющих, по горизонтальной оси представлены номера осей синусной или косинусной составляющей.

На рис. 4 и 5 представлены координаты разложения абсолютной погрешности, обусловленной неравенством максимальных напряжений на входе сумматора. Условно такая погрешность называется амплитудной погрешностью. Общее количество осей выбрано равным 160: 80 осей для синусных составляющих разложения с целью получения коэффициентов Фурье и 80 осей для косинусных составляющих.

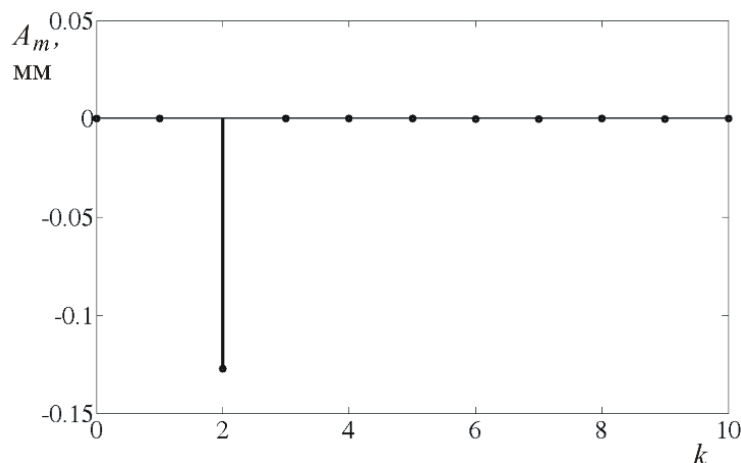


Рис. 4. Координаты разложения абсолютной погрешности

Из рис. 4 и 5 следует, что синусная составляющая имеет амплитуду, не равную нулю только по второй оси. Косинусная составляющая указывает на то, что амплитудная погрешность имеет постоянную составляющую величиной 0,01 мм.

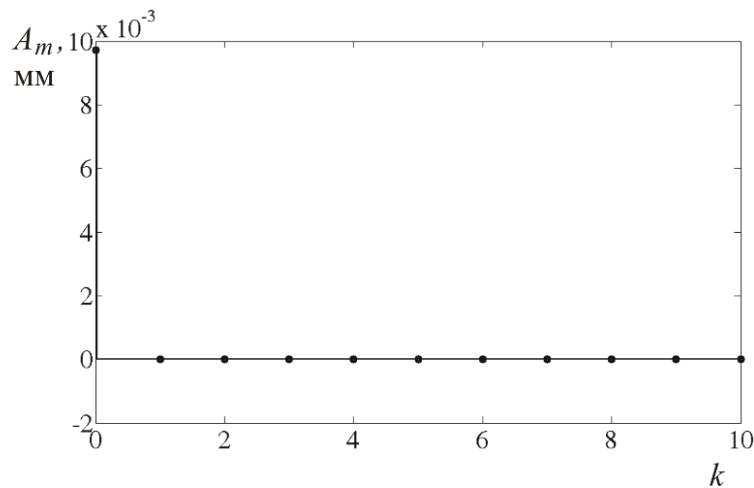


Рис. 5. Координаты разложения абсолютной погрешности

Погрешность измерительной системы зависит и от характеристик генератора. Одним из его параметров является стабильность частоты. Изменение частоты приводит к изменению сопротивлений частотозависимых элементов. К таким элементам относится электромагнитный преобразователь и фазовращатели.

Список литературы

1. Добровольский И. Г. Анализ точности измерений значений информационно-измерительных систем // Контроль. Диагностика. 2002. № 5. С. 41–44.
2. Горячев В. Я., Шатова Ю. А. Основы теории и способы анализа распределенных магнитных линий с плоскопараллельным бегущим магнитным полем // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Пенза, 2007. С. 79–82.
3. Зарипов М. Ф. Индуктивные преобразователи больших линейных перемещений с распределенными параметрами магнитных цепей : автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1963.
4. Горячев В. Я. Физические основы возникновения погрешностей датчиков с бегущим магнитным полем // Актуальные проблемы науки и образования : тр. Междунар. юбилейного симпозиума. Пенза, 2003. Т. 2. С. 238–240.

References

1. Dobrovol'skiy I.G. Analysis of the measurement accuracy of the values of information-measuring systems. *Kontrol'. Diagnostika = Control. Diagnostics*. 2002;5:41–44. (In Russ.)
2. Goryachev V.Ya., Shatova Yu.A. Analysis' fundamentals of the theory and methods of distributed magnetic lines with a plane-parallel traveling magnetic field. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Automation and control issues in technical systems: proceedings of International scientific and engineering conference*. Penza, 2007:79–82. (In Russ.)
3. Zaripov M.F. *Induktivnye preobrazovateli bol'shikh lineynykh peremeshcheniy s raspredelennymi parametrami magnitnykh tsepey: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk = Inductive transducers of large linear displacements with distributed parameters of magnetic circuits: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences*. Moscow, 1963. (In Russ.)

4. Goryachev V.Ya. Physical foundations of errors of sensors with a traveling magnetic field. *Aktual'nye problemy nauki i obrazovaniya: tr. Mezhdunar. yubileynogo simpoziuma* = *Actual issues of science and education: proceedings of International anniversary symposium*. Penza, 2003;2:238–240. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Омирзак Коптилеуулы Абдирашев

старший преподаватель кафедры
космической техники и технологий,
Евразийский национальный
университет имени Л. Н. Гумилева
(Республика Казахстан, г. Нур-Султан,
ул. Сатпаева, 2)

E-mail: omeke_92@mail.ru

Omirezak K. Abdirashev

Senior lecturer of the sub-department
of space engineering and technology,
Eurasian National University named
after L. N. Gumilyov (2 Satpaeva street,
Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan)

Поступила в редакцию / Received 26.04.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.05.2021

Принята к публикации / Accepted 25.05.2021

УДК 621.317

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-8

Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах

Е. А. Бадеева¹, Т. И. Мурашкина²,
Е. А. Полякова³, И. Е. Славкин⁴, А. Н. Кукушкин⁵

^{1,2,4,5}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

¹badeeva_elena@mail.ru, ²timurashkina@mail.ru, ³yek.polyakova2016@yandex.ru,

⁴ilya-slavkin@yandex.ru, ⁵Kukushkin.97@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для повышения точности перспективных волоконно-оптических информационно-измерительных систем, применяемых в жестких условиях ракетно-космической и авиационной техники, целесообразно применение метода инвариантности, в основу которого положен принцип многоканальности с использованием как минимум двух каналов приема и преобразования сигналов, построенных таким образом, чтобы совместная обработка сигналов в электронном тракте приводила к компенсации помех, снижению дополнительных погрешностей, обусловленных воздействием внешних влияющих факторов (климатических, механических), изменением напряжения питания, изгибами оптических волокон. Необходимо выявить условия, обеспечивающие деление светового потока в миро-оптико-механической системе волоконно-оптических датчиков как минимум на два независимых потока, преобразование которых осуществляется независимо в двух измерительных каналах, а также определить структуру инвариантной волоконно-оптической информационно-измерительной системы, реализующей принцип многоканальности. *Цель работы* – обоснование и реализация принципа пространственной двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах для снижения дополнительных погрешностей в условиях воздействия внешних влияющих факторов. *Материалы и методы.* Представлена теория, развивающая принцип двухканальности, включая необходимые и достаточные условия ее физической реализации в инвариантных волоконно-оптических информационно-измерительных системах. Предложено двухканальное пространственное преобразование оптических сигналов непосредственно в зоне измерения путем деления одного светового потока на два с помощью особых схем расположения оптических волокон в торцах волоконно-оптических кабелей и оптико-модулирующих элементов, измерительные преобразования которых осуществляются независимо в первом и втором измерительных каналах. *Результаты.* Разработана инвариантная волоконно-оптическая информационно-измерительная система, реализующая принцип пространственной двухканальности путем преобразования двух независимых световых потоков от одного источника излучения, обеспечивающий улучшение ее технических и эксплуатационных характеристик при эксплуатации в условиях характерных изделиям ракетно-космической и авиационной техники. *Выводы.* Принцип двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах позволил при реализации логотрического или амплитудно-фазового преобразования в 1,5–2 раза снизить дополнительные погрешности измерения, обусловленные воздействием внешних влияющих факторов, свойственных ракетно-космической и авиационной технике.

Ключевые слова: принцип двухканальности, инвариантность, волоконно-оптическая информационно-измерительная система, датчик, измерительный преобразователь, преобразование, световой поток

Для цитирования: Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Полякова Е. А., Славкин И. Е., Кукушкин А. Н. Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 87–98. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-8

The implementation of the two-channel principle in fiber-optic information-measuring systems

Е.А. Бадеева¹, Т.И. Мурашкина²,
Е.А. Полякова³, И.Е. Славкин⁴, А.Н. Кукушкин⁵

^{1,2,4,5}Penza State University, Penza, Russia

³Research Institute for Physical Measurements, Penza, Russia

¹badeeva_elena@mail.ru, ²timurashkina@mail.ru, ³yek.polyakova2016@yandex.ru,

⁴ilya-slavkin@yandex.ru, ⁵Kukushkin.97@mail.ru

Abstract. *Background.* To improve the accuracy of advanced fiber-optic information and measurement systems used in the harsh conditions of rocket and space and aviation technology, it is advisable to use the invariance method, which is based on the principle of multichannel using at least two channels for receiving and converting signals, designed in such a way that joint signal processing in the electronic path leads to interference compensation, reduction of additional errors due to the influence of external influencing factors (climatic, mechanical, etc.), changes in the supply voltage, bends of optical fibers. It is necessary to identify the conditions that ensure the division of the light flux in the micro-opto-mechanical system of fiber-optic sensors into at least two independent streams, the conversion of which is carried out independently in two measuring channels, as well as to determine the structure of an invariant fiber-optic information and measurement system that implements the principle of multichannel. The purpose of the work is to substantiate and implement the principle of spatial two-channel communication in fiber-optic information and measurement systems to reduce additional errors under the influence of external influencing factors. *Materials and methods.* A theory is presented that develops the principle of two-channel communication, including the necessary and sufficient conditions for its physical implementation in invariant fiber-optic information and measurement systems. A two-channel spatial transformation of optical signals directly in the measurement zone is proposed by dividing one light flux into two using special schemes for the arrangement of optical fibers at the ends of fiber-optic cables and optical-modulating elements, the measurement transformations of which are carried out independently in the first and second measurement channels. *Results.* An invariant fiber-optic information and measurement system has been developed that implements the principle of spatial two-channel transmission by converting two independent light streams from a single radiation source, which improves its technical and operational characteristics when operating under conditions characteristic of rocket-space and aviation equipment products. *Conclusions.* The two-channel principle in fiber-optic information and measurement systems made it possible to reduce additional measurement errors due to the influence of external influencing factors inherent in rocket and space and aviation technology by 1.5–2 times when implementing logometric or amplitude-phase conversion.

Keywords: two-channel principle, invariance, fiber-optic information and measurement system, sensor, measuring converter, conversion, luminous flux

For citation: Бадеева Е.А., Мурашкина Т.И., Полякова Е.А., Славкин И.Е., Кукушкин А.Н. The implementation of the two-channel principle in fiber-optic information-measuring systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;2:87–98. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-8

Введение

Академик Б. Н. Петров сформулировал принцип двухканальности – необходимое условие компенсации влияния на технические характеристики средства измерений внешних влияющих факторов (ВВФ) [1]. Совокупность необходимых и достаточных условий, на которой основан принцип двухканальности, позволила реализовать его в разных классах инвариантных измерительных устройств [2–4]. Целесообразно этот принцип применить к волоконно-оптическим информационно-измерительным системам (ВОИИС), которые применяются в жестких условиях ракетно-космической и авиационной техники (РК и АТ) для улучшения их технических и эксплуатационных характеристик [5, 6].

Цель работы – обоснование и реализация принципа пространственной двухканальности в ВОИИС для снижения дополнительных погрешностей в условиях воздействия внешних влияющих факторов.

1. Материал и методика

Одним из наиболее распространенных методов построения высокоточных измерительных устройств является метод инвариантности, в основу которого положен принцип многоканальности с использованием как минимум двух каналов приема и преобразования сигналов, построенных таким образом, чтобы совместная обработка сигналов в электронном тракте приводила к компенсации помех, снижению дополнительных погрешностей, обусловленных воздействием внешних влияющих факторов (климатических, механических), изменением напряжения питания, изгибами оптических волокон [1]. Представлена теория, развивающая принципы двухканальности, включая необходимые и достаточные условия ее физической реализации, в инвариантных ВОИИС. Предложено двухканальное пространственное преобразование оптических сигналов непосредственно в зоне измерения путем деления светового потока на два световых потока с помощью особых схем расположения оптических волокон в торцах волоконно-оптических кабелей (ВОК) и оптико-модулирующих элементов (ОМЭ), измерительные преобразования которых осуществляются независимо в первом и втором измерительных каналах (ИК), что исключает погрешности, свойственные волоконно-оптическим датчикам (ВОД) с открытым оптическим каналом.

На конкретных примерах рассмотрены вопросы физической реализуемости базовых для ВОИИС двухканальных волоконно-оптических измерительных преобразователей (ВОП).

2. Результаты

На рис. 1 представлена структурная схема инвариантной ВОИИС, объединяющей N -е количество ВОД с открытым оптическим каналом [7], реализующей принцип двухканальности с микро-оптико-механическим трактом выделения измерительной информации о различных физических величинах, характеризующих состояние объекта измерения [8].

В основу этой схемы положен принцип инвариантности.

ВОД с открытым оптическим каналом, входящие в состав ВОИИС, имеют унифицированную конструкцию, состоящую в общем случае из ВОП,

основным элементом которого является микро-опто-механическая система (МОМС), ВОК, согласующего устройства (СУ), в состав которого входят ИК-светодиод и два согласованных с ним по спектру фотодиода (по одному на каждый измерительный канал). МОМС включает воспринимающий (чувствительный) (ВЭ) и оптико-модулирующий элементы. В качестве ОМЭ в ВОД с открытым оптическим каналом используются поверхности с различными коэффициентами отражения (чаще всего зеркальные или сочетание поглощающей и зеркальной поверхностей), с разными радиусами кривизны (шаровые, цилиндрические линзы), с разными коэффициентами преломления и др. [9].

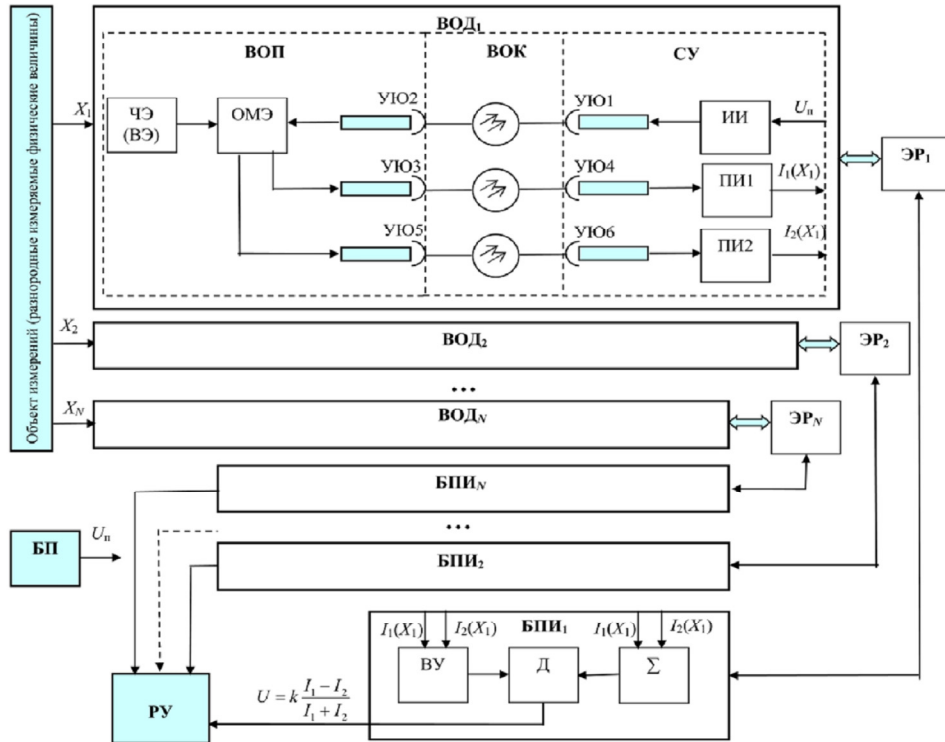


Рис. 1. Структурная схема инвариантной ВОИИС, реализующей принцип двухканальности: ВОД – волоконно-оптический датчик; ВОП – волоконно-оптический преобразователь; ВОК – волоконно-оптический кабель; СУ – согласующее устройство; БПИ – блок преобразования информации; ЭР – электрический разъем; БП – блок питания; РУ – регистрирующее устройство; ИИ, ПИ – источник и приемник излучения; ЧЭ (ВЭ) – чувствительный (воспринимающий) элемент; ОМЭ – оптико-модулирующий элемент; УЮ – узел юстировки; $X_1 \dots X_N$ – измеряемые физические величины

ВОК необходим для передачи светового потока через узлы юстировки УЮ1...УЮ6 от источника излучения ИИ в зону измерения и обратно к приемникам излучения ПИ1 и ПИ2 первого и второго ИК соответственно.

ВОД стыкуются с блоками преобразования информации (БПИ) через электрические разъемы (ЭР). При этом БПИ и состыкованные с ними СУ отнесены в более благоприятные условия из радиационной искро-взрыво-

пожароопасной зоны измерений на расстояние 100...2000 м. Данные с выходов БПИ поступают на регистрирующее устройство РУ.

БПИ₁...БПИ_N могут быть объединены в едином корпусе.

3. Обсуждение

ВОИИС работает следующим образом. Измеряемые физические величины $X, X_1...X_N$ воздействуют на ВЭ (например, мембрану в ВОД давления), который жестко связан с ОМЭ (например, аттенюатор в ВОД давления) [10].

Световой поток Φ_0 , сформированный источником излучения ИИ, посредством узлов юстировки УЮ1 и УЮ2 по подводящим оптическим волокнам (ПОВ) ВОК передается в зону измерений ВОП в направлении ОМЭ, который осуществляет или линейное, или угловое микроперемещение под воздействием измеряемой величины X , вызывая изменение интенсивности оптического сигнала Φ_0 . Одна часть светового потока $\Phi_1(X)$, промодулированного в функции измеряемой физической величины X , поступает в оптические волокна первого измерительного канала; вторая часть $\Phi_2(X)$ потока, промодулированного в функции измеряемой физической величины X , поступает в оптические волокна второго измерительного канала. Световые потоки через узлы юстировки УЮ3...УЮ6 передаются на приемники излучения первого и второго измерительных каналов ПИ1 и ПИ2 соответственно, расположенные в СУ, где происходит их фотоэлектрическое преобразование. С выхода СУ снимаются электрические сигналы $I_1(X)$ и $I_2(X)$. Данные сигналы поступают на вход БПИ, где происходит, например, операция деления сигналов $I_1(X)$ и $I_2(X)$.

Улучшение технических и эксплуатационных характеристик ВОИИС в условиях воздействия радиации, изменения температур окружающей среды обуславливается тем, что с помощью БПИ осуществляется логометрическое преобразование сигналов: формируется отношение разности сигналов на выходе ИК к их сумме:

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{I_1(X) - I_2(X)}{I_1(X) + I_2(X)}. \quad (1)$$

Например, воздействие радиации на оптические волокна (ОВ) вызывает снижение прозрачности стекла, тогда выражение (1) примет вид

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{kI_1(X) - kI_2(X)}{kI_1(X) + kI_2(X)}, \quad (2)$$

где k – коэффициент снижения прозрачности ОВ.

В выражении (2) коэффициент k одинаков для ОВ первого и второго измерительных каналов, так как используются однотипные ОВ, которые расположены в едином кабельном изделии и в одной и той же зоне измерения. Соответственно сигнал $U_{\text{вых}}$ будет неизменным.

При необходимости ОВ могут быть подвергнуты воздействию ионизирующего излучения, волокна тем самым проходят ионизирующую тренировку. Если произошло изменение прозрачности ОВ, но оно не превышает 20 %, то применение двух измерительных каналов позволяет практически исключить дополнительные погрешности от воздействия радиации.

В настоящее время разработаны ОВ с повышенной радиационной стойкостью [11]. Проведенные исследования основных характеристик ОВ в процессе и после окончания γ -облучения (импульсного ионизирующего воздействия $\tau_{эф} \approx 21$ нс, уровень $\sim 1,5 \times 10^9$ р/с) показали, что прозрачность ОВ на длине волны $\lambda = 1,55$ мкм практически восстанавливается до исходного значения приблизительно через 100 мс для всех типов образцов при комнатной температуре, а в интервале температур (минус 60... плюс 20 °С) приблизительно через 500 мс. Радиационно-стойкие ОВ имеют ресурс 200 000 ч, срок службы 25 лет и выдерживают уровень радиации до 16 МГр γ -излучения.

Кроме того, при логометрическом преобразовании наблюдается удвоение чувствительности преобразования, линеаризация выходной зависимости, снижается влияние на точность измерения неинформативных изгибов волоконно-оптического кабеля, изменения мощности излучения источника излучения и чувствительности приемников излучения.

Если один из измерительных каналов является компенсационным, в котором компенсационный сигнал остается постоянным в процессе измерения, то можно выполнить амплитудно-фазовое преобразование сигналов с выхода рабочего $I_p(X)$ и компенсационного каналов I_k [12]. В этом случае сигнал ИИ должен быть промодулирован гармоническим сигналом, интенсивность которого меняется при изменении измеряемой физической величины. За счет разнополярного питания рабочих и компенсационных приемников излучения сигнал U_k первоначально сдвинут относительно сигнала $U_p(X)$ на угол 180° . Путем подбора элементов фазосдвигающей цепи создается постоянный сдвиг фаз $90 < \varphi_0 < 180^\circ$ между сигналами $U_p(X)$ и U_k . Сигналы $U_p(X)$ и U_k суммируются. Суммарный сигнал $U_\Sigma(X)$ поступает на один из входов фазометра, на второй вход которого поступает опорный сигнал U_k . Зависимость фазы φ суммарного сигнала $U_\Sigma(X)$ от значения измеряемой физической величины является выходным сигналом:

$$\varphi = \arctg \frac{\sin \varphi_{12}}{\cos \varphi_{12} + \frac{U_k}{U_p(X)}}. \quad (3)$$

Так как в выражении (3) сигналы $U_p(X)$ и U_k находятся в отношении, то пропорциональные изменения этих сигналов, обусловленные изменением параметров источников и приемников излучения, напряжения питания, изгибами оптических волокон и т.п., не влияют на результаты измерений.

Условия, обеспечивающие реализацию принципа двухканальности в ВОИИС

Для того чтобы осуществить двухканальное преобразование оптических сигналов в зоне открытого оптического канала ВОП, необходимо сформировать световой поток от одного ИИ, передавать его в зону измерения по ПОВ, на выходе ПОВ сформировать структуру светового потока, позволяющую разделить его на два независимых потока (например, по оси X) с помощью ОМЭ и особых взаимных расположений рабочих торцов оптических волокон на концах ВОК (рис. 2) [6].

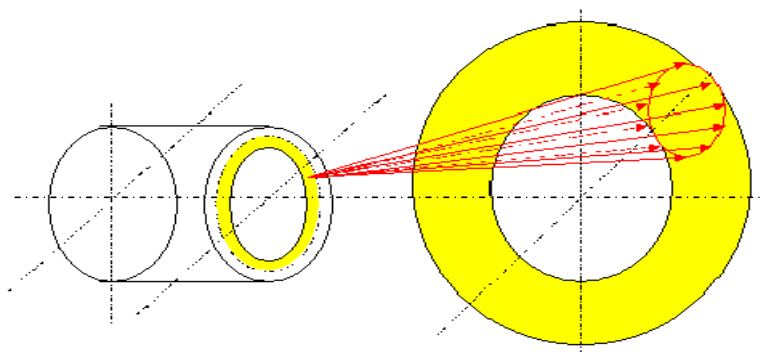


Рис. 2. Формирование кольцевой зоны на выходе из оптического волокна

Известно, что в результате множества отражений внутри ОВ происходит симметризация пучка лучей относительно оптической оси ОВ и усреднение освещенности по излучательному торцу волокна [8]. Симметризация приводит к тому, что узкий конический пучок лучей, падающий под некоторым углом на входной торец ОВ с прямыми торцами, на выходе заполняет пространственную зону, ограниченную двумя близкими коаксиальными поверхностями. В сечении, перпендикулярном оптической оси, наблюдается кольцевая зона. Это обстоятельство предоставляет возможность разделить световой поток на две и более частей непосредственно в зоне преобразования измеряемой физической величины с последующим преобразованием параметров этих частей светового потока независимо друг от друга в двух и более измерительных каналах. Например, если в качестве ОМЭ используется цилиндрическая линза, то в плоскости расположения ООВ наблюдается световое пятно в виде овала, которое образовано двумя эллипсами (рис. 3) [13]. Соответственно расположение одного ООВ в верхней части овала, а второго ООВ – в нижней части овала позволяет разделить световой поток на две независимые части. Разделенные световые потоки будут затем преобразовываться в первом или во втором ИК.

Разделить световой поток на два независимых потока можно двумя основными способами:

1) к ИИ подвести одно ПОВ, общее для обоих ИК, а разделение на два потока осуществлять с помощью ОМЭ;

2) к одному ИИ подвести ПОВ первого и второго ИК, по которым световые потоки направляются в зону измерения, а дальнейшие преобразования осуществлять отдельно в каждом ИК [6].

Кроме того, необходимо, чтобы:

1) в зоне расположения ОМЭ и приемных торцов ООВ было равномерное распределение интенсивности света;

2) должны быть такие взаимные пространственные расположения ОВ в торцах ВОК и излучающего торца ОВ относительно ОМЭ, которые обеспечивают увеличение сигнала в одном канале и уменьшение в другом;

3) конструктивно-технологическое исполнение дифференциального ОМЭ должно обеспечивать увеличение сигнала в одном канале и уменьшение в другом.

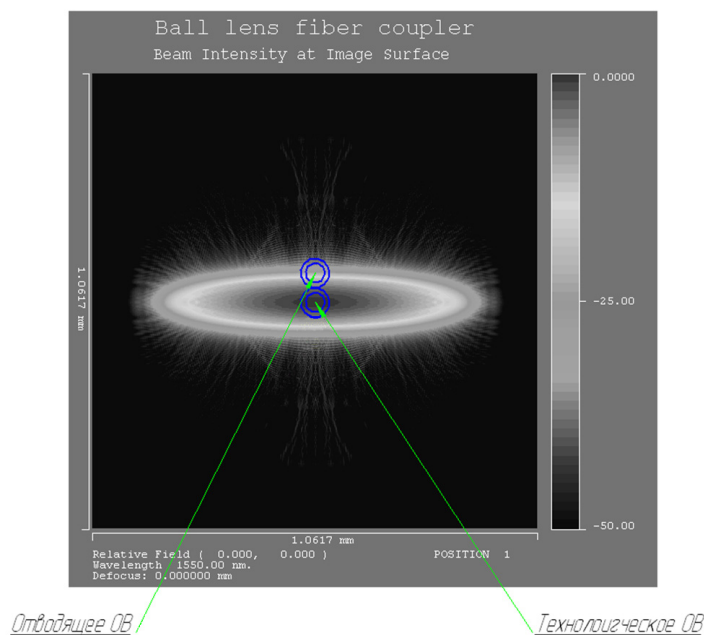


Рис. 3. Световое пятно в виде овала в плоскости расположения ООВ (технологическое ОВ является проекцией ПОВ)

Пример реализации деления светового потока на два приведен на рис. 4, когда к ИИ подведено одно ПОВ, общее для обоих ИК, а пространственное деление потока осуществляется с помощью ОМЭ в виде предельного аттенюатора с круглым отверстием [14].

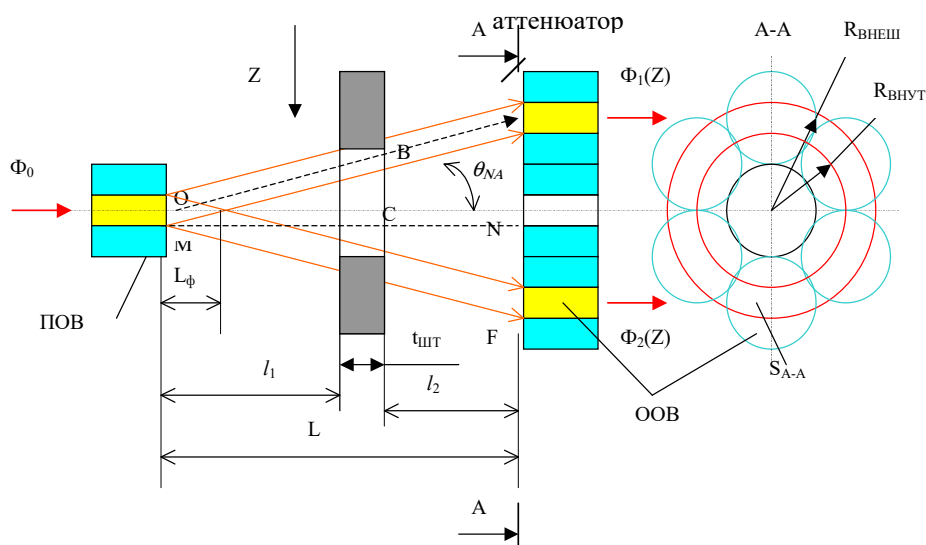


Рис. 4. Пример деления светового потока на два в ВОП с предельным аттенюатором с круглым отверстием

В состав ВОП входит аттенюатор с круглым отверстием, который закреплен на чувствительном элементе (например, мембране в ВОД давления)

и расположен на расстояниях l_1 от излучающего торца ПОВ и l_2 от приемного торца ООВ.

ВОП функционирует следующим образом: световой поток Φ_0 , сформированный на выходе ПОВ, проходит сквозь отверстие attenuатора, движение которого вдоль оси Z относительно приемных торцов ООВ1 и ООВ2 соответствует измеряемому параметру [10]. Перемещение attenuатора ведет к перекрытию части светового потока непрозрачной частью экрана и, соответственно, к изменению интенсивности световых потоков $\Phi_1(Z)$ и $\Phi_2(Z)$, поступающих по ООВ на ПИ первого и второго ИК соответственно.

На рис. 5 показаны относительные изменения интенсивностей световых потоков от перемещения ОМЭ в поперечном направлении Z :

- $\Phi_1/\Phi_0 = f(Z)$ (участок I) первого измерительного канала,
- $\Phi_2/\Phi_0 = f(Z)$ (участок II) второго измерительного канала в диапазоне измерения для ВОП микроперемещений (например, для ВОП с предельным attenuатором [10]).

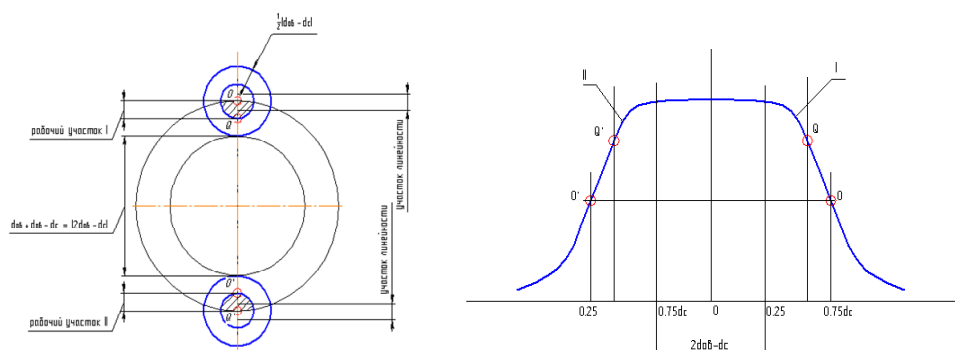


Рис. 5. Относительное изменение интенсивностей $\Phi_1/\Phi_0 = f(Z)$ (участок I) и $\Phi_2/\Phi_0 = f(Z)$ (участок II) светового потока в ВОП в области приемных торцов ООВ

Важным элементом реализации принципа двухканальности является требование независимости двух измерительных каналов, когда световой поток первого ИК не попадает в ООВ второго измерительного канала и, наоборот, световой поток второго ИК не попадает в ООВ первого ИК. Это возможно, если есть горизонтальная прямая, соединяющая на графике зависимости $\Phi_1/\Phi_0 = f(Z)$ и $\Phi_2/\Phi_0 = f(Z)$, что достигается изменением расстояний между оптическими осями ОВ и изменением расстояний от ОВ до attenuатора.

Заключение

Разработана инвариантная ВОИИС, реализующая принцип пространственной двухканальности путем преобразования двух независимых световых потоков от одного источника излучения, обеспечивающий при реализации логометрического или амплитудно-фазового преобразования в 1,5–2 раза снизить дополнительные погрешности измерения, обусловленные воздействием внешних влияющих факторов изделиям РК и АТ.

Список литературы

1. Петров Б. Н., Виктор В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Принцип инвариантности в измерительной технике. М. : Наука, 1976. 242 с.

2. Нестеров В. Н., Ли А. Р. Теория и практика проектирования инвариантных измерительных преобразователей и систем на основе двухканального принципа // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. Т. 18, № 4 (7). С. 1414–1422.
3. Свистунов Б. Л. Измерительные преобразователи для параметрических датчиков с использованием аналитической избыточности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 2. С. 94–100.
4. Чернецов М. В., Чураков П. П. Инвариантное преобразование в измерительных системах с параметрическими датчиками // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2018. № 1. С. 11–17.
5. Murashkina T. I., Istomina T. V., Slavkin I. E., Chukareva M. M., Badeeva E. A., Motin A. V., Intellectual measuring system based of fiber optic sensors // Information Innovative Technologies : materials of the International scientific-practical conference / Uvaysov S. U., Ivanov I. A. (ed.). Moscow : Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018. 652 p.
6. Murashkina T. I., Badeeva E. A., Yurova O. V., Savochkina M. M., Motin A. V. Transformation of Signals in the Optic Systems of Differenzial-type Fiber-Optic Transducers // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11, iss. 13. P. 2853–2857. doi:10.3923/jeasci.2016.2853.2857
7. Бадеева Е. А., Щербакова А. А., Полякова Е. А., Мурашкина Т. И. Оценка взрывопожаробезопасности информационно-измерительных систем на базе волоконно-оптических датчиков с открытым оптическим каналом // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР : сб. тр. 11-й Междунар. науч.-техн. конф. (21–24 мая 2019 г., ОКБ «Гидропресс» г. Подольск). Подольск, 2019. С. 148–150.
8. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Волоконно-оптические приборы и системы: Научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем» Пензенского государственного университета Ч. I. СПб. : Политехника, 2018. 187 с.
9. Badeeva E. A., Murashkina T. I., Savochkina M. M. Luminous flux control in a fiber-optic measuring transducer // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2017. Vol. 803 (1).
10. Бадеева Е. А., Мещеряков В. А., Мурашкина Т. И. [и др.]. Волоконно-оптические датчики давления аттенуаторного типа для летательных аппаратов // Датчики и системы. 2003. № 4. С. 11–14.
11. Долгов И. И., Иванов Г. А., Чаморовский Ю. К., Яковлев М. Я. Радиационно-стойкие одномодовые ОВ с кварцевой сердцевиной // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. 2005. № 6 (46). С 4–10.
12. Патент 2740538 Российская Федерация. Способ преобразования светового потока и реализующий его волоконно-оптический датчик давления / Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И., Бадеев А. В. Оpubл. 15.01.2021, Бюл № 2.
13. Murashkina T. I., Motin A. V., Badeeva E. A. Mathematical simulation of the optical system of a fiber-optic measuring micro motion converter with a cylindrical lens modulation element // Journal of Physics: Conference Series (JPCS). 2017. Vol. 803 (1). P. 012101.
14. Патент 2290605 Российская Федерация. Волоконно-оптический преобразователь перемещения / Пивкин А. Г., Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Оpubл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

References

1. Petrov B.N., Viktorov V.A., Lunkin B.V., Sovlukov A.S. *Printsip invariantnosti v izmeritel'noy tekhnike = The principle of invariance in measuring technolog.* Moscow: Nauka, 1976:242. (In Russ.)
2. Nesterov V.N., Li A.R. Theory and practice of designing invariant measuring transducers and systems based on the two-channel principle. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of Sama Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2016;18(4):1414–1422. (In Russ.)

3. Svistunov B.L. Transmitters for parametric sensors using analytical redundancy. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;2(20):94–100. (In Russ.)
4. Chernetsov M.V., Churakov P.P. Invariant transformation in measuring systems with parametric sensors. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2018;1(23):11–17. (In Russ.)
5. Murashkina T.I., Istomina T.V., Slavkin I.E., Chukareva M.M., Badeeva E.A., Motin A.V. Intellectual measuring system based of fiber optic sensors. *Information Innovative Technologies: materials of the International scientific – practical conference*. Moscow: Association of graduates and employees of AFEA named after prof. Zhukovsky, 2018:652.
6. Murashkina T.I., Badeeva E.A., Yurova O.V., Savochkina M.M., Motin A.V. Transformation of Signals in the Optic Systems of Differenzial-type Fiber-Optic Transducers. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016;11(13):2853–2857. doi:10.3923/jeasci.2016.2853.2857
7. Badeeva E.A., Shcherbakova A.A., Polyakova E.A., Murashkina T.I. Evaluation of explosion and fire safety of information-measuring systems based on fiber-optic sensors with an open optical channel. *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER: sb. tr. 11-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (21–24 maya 2019 g., OKB «Gidropress» g. Podol'sk) = The security of the NPP with WWER: proceedings of the 11th International scientific and engineering conference (Podolsk, OKB “Gidropress”, May 21-24, 2019)*. Podol'sk, 2019:148–150. (In Russ.)
8. Murashkina T.I., Badeeva E.A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: Nauchnye razrabotki NTTs «Nanotekhnologii volokonno-opticheskikh sistem» Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta Ch. I = Fiber optic devices and systems: Research and Development Center “Nanotechnology of fiber optic systems”, Penza State University, Part I*. Saint-Petersburg: Politekhnik, 2018:187. (In Russ.)
9. Badeeva E.A., Murashkina T.I., Savochkina M.M. Luminous flux control in a fiber-optic measuring transducer. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2017;803(1).
10. Badeeva E.A., Meshcheryakov V.A., Murashkina T.I. [et al.] Aircraft attenuator type fiber optic pressure sensors. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2003;4:11–14. (In Russ.)
11. Dolgov I.I., Ivanov G.A., Chamorovskiy Yu.K., Yakovlev M.Ya. Radiation-resistant single-mode optical fiber with a quartz core. *FOTON-EKSPRESS = PHOTON-EXPRESS*. 2005;6(46):4–10. (In Russ.)
12. Patent 2740538 Russian Federation. *Sposob preobrazovaniya svetovogo potoka i realizuyushchiy ego volokonno-opticheskiy datchik davleniya = A method for converting a luminous flux and a fiber-optic pressure sensor that implements it*. Badeeva E.A., Murashkina T.I., Serebryakov D.I., Badeev A.V. Publ. 15.01.2021, bull. no. 2. (In Russ.)
13. Murashkina T.I., Motin A.V., Badeeva E.A. Mathematical simulation of the optical system of a fiber-optic measuring micro motion converter with a cylindrical lens modulation element. *Journal of Physics: Conference Series (JPCS)*. 2017;803(1):012101.
14. Patent 2290605 Russian Federation. *Volokonno-opticheskiy preobrazovatel' peremeshcheniya = Fiber-optic displacement converter*. Pivkin A.G., Murashkina T.I., Badeeva E.A. Publ. 27.12.2006, bull. no. 36. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры бухгалтерского
учета, налогообложения и аудита,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Elena A. Badeeva

Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of accounting, taxation and audit,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Татьяна Ивановна Мурашкина

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборостроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: timurashkina@mail.ru

Tat'yana I. Murashkina

Doctor of engineering sciences, professor,
professor of the sub-department
of instrument engineering, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Екатерина Алексеевна Полякова

начальник отдела надежности,
Научно-исследовательский институт
физических измерений (Россия, г. Пенза,
ул. Володарского, 8/10)

E-mail: yek.polyakova2016@yandex.ru

Ekaterina A. Polyakova

Head of reliability department,
Research Institute for Physical
Measurements (8/10 Volodarskogo
street, Penza, Russia)

Илья Евгеньевич Славкин

аспирант, Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: ilya-slavkin@yandex.ru

Ilya E. Slavkin

Postgraduate student, Penza State
University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Алексей Николаевич Кукушкин

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Kukushkin.97@mail.ru

Aleksey N. Kukushkin

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 12.05.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 21.05.2021

Принята к публикации / Accepted 27.05.2021

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 623.618

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-9

Вероятностно-временная модель функционирования иерархической системы управления разнородными территориально распределенными объектами

А. Ю. Козлов¹, А. И. Сидоров²

^{1,2}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹_kozlov_@mail.ru, ²sidorov_62@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* На современном уровне развития иерархических систем активно развивается направление сетевого способа формирования объектов управления. В частности, в качестве таких объектов рассматриваются разнородные территориально распределенные объекты управления (ТРОУ), задачами которых являются: мониторинг внешней среды, доставка грузов мобильными роботами, устранение последствий чрезвычайных ситуаций и т.д. Актуальной и сложной является проблема организации управления сформированной сетью ТРОУ, элементы которой изначально являются разнородными и принадлежат различным эргатическим системам. Объектом исследования является функциональная структура системы управления ТРОУ. Предметом исследования является методика построения вероятностно-временной модели функционирования иерархической системы управления (ИСУ) разнородными территориально распределенными объектами. Цель исследования – получение интегрального и дифференциального законов распределения времени доставки сообщений из единого информационного пространства до сети ТРОУ на основе экспоненциального и нормального законов обработки информации в последовательных фазах. *Материалы и методы.* В процессе исследований выполняется построение вероятностно-временной модели функционирования ИСУ ТРОУ на основе теории вероятностей и теории иерархических систем. *Результаты.* Разработана вероятностно-временная модель ИСУ для управления ТРОУ. Предложены новые математические зависимости для интегрального и дифференциального законов распределения времени доставки сообщений из единого информационного пространства до сети ТРОУ на основе экспоненциального и нормального законов обработки информации в последовательных фазах. *Выводы.* Вероятностно-временная модель позволяет разработчику обоснованно подходить к заданию параметров ИСУ при ее синтезе исходя из требуемого времени доставки сообщений до сети ТРОУ с заданной вероятностью.

Ключевые слова: вероятностно-временная модель, иерархическая система управления, закон управления, территориально распределенные объекты управления

Для цитирования: Козлов А. Ю., Сидоров А. И. Вероятностно-временная модель функционирования иерархической системы управления разнородными территориально распределенными объектами // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 99–112. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-9

© Козлов А. Ю., Сидоров А. И., 2021. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

The robability-time model functioning of the hierarchical system management of heterogeneous territorial placed objects

A.Yu. Kozlov¹, A.I. Sidorov²

^{1,2}Penza State University, Penza, Russia

¹_kozlov_@mail.ru, ²sidorov_62@mail.ru

Abstract. *Background.* At the current level of hierarchical systems' development, the direction of the network method for forming control objects is actively developing. In particular, such objects are considered heterogeneous territorial placed control objects (TPCO), the tasks of which are: monitoring the external environment, delivery of goods by mobile robots, elimination of the consequences of emergency situations, etc. The problem of organizing the management of a formed TPCO network, the elements of which are initially heterogeneous and belong to different ergatic systems, is urgent and complex. The object of the research is the functional structure of the control system (CS) of the TPCO. The subject of the research is the method of constructing a probabilistic-time model of the functioning of a hierarchical control system (HCS) by different geographically distributed objects. The aim of the study is to obtain the integral and differential laws of the distribution of the time of message delivery from the unified information space (UIS) to the TPCO network based on the exponential and normal laws of information processing in successive phases. *Materials and methods.* In the course of the research, a probabilistic-time model of the functioning of the TPCO HCS is constructed on the basis of probability theory and the theory of hierarchical systems. *Results.* A probabilistic-time model of the HCS for TPCO control is developed. New mathematical dependences are proposed for the integral and differential distribution laws of the time of message delivery from the UIS to the TPCO network based on the exponential and normal laws of information processing in successive phases. *Conclusions.* The probabilistic-time model allows the developer to reasonably approach the setting of the parameters of the HCS during its synthesis, based on the required time of message delivery to the TPCO network with a given probability.

Keywords: probabilistic-temporal model, hierarchical control system, control law, territorial placed control objects

For citation: Kozlov A.Yu., Sidorov A.I. The robability-time model functioning of the hierarchical system management of heterogeneous territorial placed objects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* = *University proceedings. Volga region. Engineering sciences*. 2021;2:99–112. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-9

Введение

В общем случае управление сетью разнородных территориально распределенных объектов управления (ТРОУ) осуществляется следующим образом: информация о внешней среде из единого информационного пространства (ЕИП) поступает в систему управления (СУ), где в соответствии с поставленной задачей на основе анализа поступивших сведений вырабатываются управляющие воздействия, которые, в свою очередь, поступают в сеть ТРОУ. Под влиянием управляющих воздействий сеть ТРОУ сохраняет или принимает новое состояние. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполнена поставленная задача.

Суммарное время, затраченное на прохождение информации из ЕИП в СУ, переработку этой информации СУ в управляющую информацию и доведение управляющей информации до сети ТРОУ, представляет собой основ-

ной параметр, определяющий цикл управления. От того, насколько своевременно будет организована передача данных в СУ из единого информационного пространства, а из СУ – в сеть ТРОУ, во многом зависит оперативность управления сетью ТРОУ.

Если принять, что в качестве элементов СУ выделены конструктивно, функционально или организационно завершенные элементы, то СУ сетью ТРОУ будет однозначно задана с помощью своей структуры, определяющей совокупность и взаимосвязь ее отдельных элементов. Следовательно, качество функционирования СУ (например, оперативность управления) в значительной мере будет зависеть от ее структуры.

Таким образом, процесс обработки информации при управлении сетью ТРОУ определяется структурой СУ, т.е. взаимосвязью ее отдельных элементов, определяющей закон функционирования (управления) СУ, который может быть задан в виде функциональной зависимости между входными и выходными величинами СУ. Так как закон функционирования СУ определяется ее структурой, то и способность СУ к адаптации и перераспределению функций между элементами в результате динамической реконфигурации также зависит от ее структуры.

Иерархическая структура с последовательно-параллельными связями представляет собой совокупность элементов СУ, имеющих связи по вертикали (по восходящим и нисходящим связям) между элементами различных уровней и по горизонтали (по параллельным связям) между элементами одного и того же уровня. При иерархической структуре допустимо также наличие связей подчиненности нескольких объектов управления одному элементу нижнего уровня СУ. В данной структуре обработка информации осуществляется с помощью средств различных уровней при участии и под непосредственным управлением средства высшего уровня [1].

Закон функционирования элемента k -го уровня (ранга) СУ с иерархической структурой описывается рекуррентным соотношением $u_i^{(k-1)} = F_k(x_i^{(k-1)}, x_i^{(k)})$. Количественно СУ с иерархической структурой может быть охарактеризована числом уровней управления и коэффициентом иерархии, под которым понимается число объектов управления на данном уровне, непосредственно подчиненных вышестоящему элементу СУ.

Учитывая, что СУ с иерархической структурой обладают большей функциональной гибкостью и живучестью при соблюдении принципа централизации управления, а это достигается благодаря распределению сложного алгоритма управления между многими средствами обработки информации, в дальнейшем на иерархический принцип формирования СУ ТРОУ будем ориентироваться как на основной.

1. Постановка задачи вероятностно-временного моделирования функционирования иерархической системы управления территориально распределенными объектами

Для описания функционирования иерархической системы управления (ИСУ) используем понятие ветви управления, под которой понимается фрагмент иерархической структуры СУ, содержащий ЕИП, центральный элемент (элемент ИСУ верхнего уровня), один объект управления (элемент сети

ТРОУ) и все промежуточные связи и элементы, которые принимают или могут принять участие во взаимодействии ЕИП с центральным элементом ИСУ, а центрального элемента ИСУ – с объектом управления.

Пусть M_2 элементов ИСУ распределены некоторым образом по M_B ветвям управления, а в каждой ветви последовательно соединены между собой M_{Bk} , $k = 1, 2, \dots, M_B$, элементов, причем различные ветви управления могут иметь общие элементы. Общим элементом для всех ветвей управления является центральный элемент, также общими элементами для различных ветвей управления могут быть элементы ИСУ второго уровня (уровня над элементами сети ТРОУ) [2].

Использование понятия ветви управления позволяет построить закон функционирования ИСУ во времени и провести вероятностно-временной анализ ее функционирования, т.е. объединить временные и стохастические характеристики функционирования ИСУ, учесть различные ситуации, приводящие к изменению ее закона функционирования.

При определении закона функционирования ИСУ будем исходить из того, что заранее известно, по какой из ветвей управления будет осуществляться передача управляющей информации из ЕИП к каждому элементу сети ТРОУ. В этом случае времена функционирования каждой ветви управления T_i будут независимыми случайными величинами, а время функционирования всей ИСУ $T(T_1, \dots, T_{M_B})$ будет являться M_B -мерным случайным вектором [3].

Будем считать, что если функционирует i -я ветвь управления, то связанная с ней величина T_i имеет заданное распределение – функцию распределения $F_i(t_i)$ и функцию плотности вероятности $f_i(t_i)$.

Учитывая, что функционирование ИСУ есть сложное событие, заключающееся в независимом функционировании каждой ветви управления, можно сформулировать интегральный закон функционирования всей ИСУ:

$$F_y(t) = F_y(t_1, \dots, t_{M_B}) = P\left(\begin{matrix} T_i < t_i \\ i = 1, \dots, M_B \end{matrix}\right) = \prod_{i=1}^{M_B} F_i(t_i). \quad (1)$$

Выражение (1) представляет собой общее выражение интегрального закона функционирования ИСУ.

Принимая во внимание, что случайный вектор T непрерывен и включает в себя независимые случайные величины, дифференцируя выражение (1) по времени, получим выражение для определения плотности распределения вероятностей случайного вектора T :

$$f_y(t) = \prod_{i=1}^{M_B} f_i(t_i). \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой общее выражение дифференциального закона функционирования ИСУ.

Математическое ожидание (МОЖ) случайной величины T_i определяется по следующей зависимости:

$$m_i = \int_0^{\infty} t f_i(t) dt . \quad (3)$$

Второй начальный момент случайной величины T_i доставки сообщений до элемента сети ТРОУ определяется по следующей зависимости:

$$\alpha_2[T_i] = \int_0^{\infty} t^2 f_i(t) dt . \quad (4)$$

Дисперсия $D[T_i]$ и среднее квадратическое отклонение (СКО) $\sigma[T_i]$ времени T_i доставки сообщений до элемента сети ТРОУ определяются формулами:

$$D[T_i] = \alpha_2[T_i] - (m_i)^2 ; \quad \sigma[T_i] = \sqrt{D[T_i]} . \quad (5)$$

Поскольку все ветви управления функционируют в параллельном режиме, то зависимости для МОЖ и СКО времени функционирования всей ИСУ будут иметь следующий вид:

$$M[T] = \max_i(m_i) , \quad (6)$$

$$D[T] = \max_i(D[T_i]) ; \quad \sigma[T] = \sqrt{D[T]} . \quad (7)$$

Знание интегрального (1) или дифференциального (2) законов доставки сообщений до сети ТРОУ позволяет решить ряд практически важных задач, например, можно со стохастической точки зрения оценить своевременность доставки сообщений до сети ТРОУ или определить требования к времени их доставки, задаваясь той или иной вероятностью своевременности их доставки. Кроме того, можно обоснованно подходить к заданию параметров ИСУ при ее синтезировании, исходя, например, из требуемого времени доставки сообщений до сети ТРОУ с заданной вероятностью.

Вероятность того, что при заданных значениях параметров ИСУ время доставки сообщений до сети ТРОУ не превысит наперед заданного времени t_3 , можно определить по формуле

$$P\{t < t_3\} \equiv F_y(t_3) = \prod_{i=1}^{M_B} F_i(t_3) = \int_0^{t_3} f_y(t) dt . \quad (8)$$

Используя выражение (2), можно также определить вероятность того, что время доставки сообщений до сети ТРОУ будет удовлетворять условию $t_a \leq t \leq t_b$, где t_a – левая граница возможного времени доставки сообщений, а $t_{\max}$ – правая граница возможного времени доставки сообщений. Искомая вероятность определяется формулой

$$P\{t_a \leq t \leq t_b\} \equiv F_y(t_b) - F_y(t_a) = \prod_{i=1}^{M_B} [F_i(t_b) - F_i(t_a)] = \int_{t_a}^{t_b} f_y(t) dt . \quad (9)$$

Время t_d доставки сообщений до сети ТРОУ, соответствующее заданной вероятности P_d , можно определить из следующей зависимости:

$$F_y(t_d) = \int_0^{t_d} f_y(t) dt = P_d. \quad (10)$$

Максимально возможное значение времени $t_{\max}$ доставки сообщений до сети ТРОУ можно найти из условия, аналогичного правилу трех стандартов:

$$F_y(t_{\max}) = \int_0^{t_{\max}} f_y(t) dt = 0,99. \quad (11)$$

Дальнейшая конкретизация полученных выражений связана с определением функций распределения $F_i(t)$ и функций плотности вероятности $f_i(t)$ (для общности рассуждений индекс i при t опущен).

2. Закон функционирования иерархической системы управления на основе экспоненциального закона обработки информации в последовательных фазах

Для определения функций распределения $F_i(t)$ и функций плотности вероятности $f_i(t)$ примем допущение о линейности процесса функционирования каждой ветви управления. В этом случае реализуется свертка законов распределения случайных величин. Закон распределения длительности реализации линейного процесса есть не что иное, как закон распределения длительности пребывания информации в многофазной системе массового обслуживания с последовательными фазами.

Обозначим момент выхода сообщения из j -го элемента i -й ветви управления через t_{ij} . Тогда длительность пребывания сообщения в данной фазе составит: $t_{ij} - t_{ij-1}$. Данная величина является случайной и имеет плотность распределения $f_{ij}(t_{ij} - t_{ij-1})$, $j = 1, 2, \dots, M_{bi}$; $t_{i0} = 0$, где M_{bi} – число фаз обработки сообщений в i -й ветви управления. Если предположить, что эти величины независимы для всех фаз обработки сообщений, то совместная плотность распределения вероятностей M_{bi} случайных величин $(t_{ij} - t_{ij-1})$ будет иметь вид

$$f_i(t_{i1} - t_{i0}, t_{i2} - t_{i1}, t_{i3} - t_{i2}, \dots, t_{iM_{bi}} - t_{iM_{bi}-1}) = \prod_{j=1}^{M_{bi}} f_{ij}(t_{ij} - t_{ij-1}). \quad (12)$$

Тогда закон распределения случайной величины T_i , определяющей длительность всего линейного процесса функционирования i -й ветви управления, будет иметь вид

$$F_i(t) = \int_{t_{i0}}^t \int_{t_{i1}}^t \int_{t_{i2}}^t \dots \int_{t_{iM_{bi}-1}}^t f_i(t_{i1} - t_{i0}, t_{i2} - t_{i1}, \dots, t_{iM_{bi}} - t_{iM_{bi}-1}) dt_{iM_{bi}} dt_{iM_{bi}-1} \dots dt_{i1} =$$

$$= \int_{t_{i0}}^t \int_{t_{i1}}^t \int_{t_{i2}}^t \cdots \int_{t_{iM_{Bi}-1}}^t \prod_{j=1}^{M_{Bi}} f_{ij}(t_{ij} - t_{ij-1}) dt_{iM_{Bi}} dt_{iM_{Bi}-1} \cdots dt_{i1}, \quad (13)$$

где интервалы интегрирования определяются временными интервалами $t_{i0} \leq t_{i1} \leq t_{i2} \leq \cdots \leq t_{iM_{Bi}} \leq t$, причем $t_{i0} < t_{i1} \leq t$ и $t_{ij-1} \leq t_{ij} \leq t$.

Формула (13) определяет необходимость многократного интегрирования. В частности, данное соотношение требует вычислений $(2^{M_{Bi}} - 1)$ интегралов. Поэтому целесообразно заранее выполнить операцию интегрирования и получить обобщенную формулу закона распределения для M_{Bi} фаз обработки сообщений. Однако такой подход возможен лишь в том случае, если заранее известна форма закона распределения времени обработки сообщений в одной фазе.

В работах [4, 5] показано, что для M_{Bi} -фазной системы массового обслуживания, на каждую k -ю фазу которой поступает простейший поток информации с интенсивностью λ_k , обслуживаемый по экспоненциальному закону с интенсивностью μ_k , закон распределения времени обработки информации имеет вид

$$F_i(t) = 1 - \sum_{j=1}^{M_{Bi}} e^{-c_j t} \prod_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^{M_{Bi}} \frac{c_k}{c_j - c_k}, \quad t \geq 0, \quad (14)$$

где c_k и c_j – характеристики k -й и j -й фаз обслуживания: $c_k = (\mu_k - \lambda_k)$; $c_j = (\mu_j - \lambda_j)$; λ_k и λ_j – интенсивности сообщений, поступающих в k -ю и j -ю фазы обслуживания; μ_k и μ_j – интенсивности обслуживания сообщений в k -й и j -й фазах обслуживания.

Дифференцируя выражение (14) по времени, получим зависимость для определения плотности распределения времени доставки сообщений по i -й ветви управления:

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^{M_{Bi}} c_j e^{-c_j t} \prod_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^{M_{Bi}} \frac{c_k}{c_j - c_k}, \quad t \geq 0. \quad (15)$$

Если для краткости записи ввести в рассмотрение обозначения

$$a_j = \prod_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^{M_{Bi}} \frac{c_k}{c_j - c_k}, \quad b_j = c_j \prod_{\substack{k=1 \\ j \neq k}}^{M_{Bi}} \frac{c_k}{c_j - c_k}, \quad (16)$$

то выражения (14) и (15) можно записать в виде

$$F_i(t) = 1 - \sum_{j=1}^{M_{Bi}} a_j e^{-c_j t}, \quad t \geq 0; \quad (17)$$

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^{M_{bi}} b_j e^{-c_j t}, \quad t \geq 0. \quad (18)$$

Выражения (17) и (18) являются соответственно интегральными и дифференциальными законами времени доставки управляющей информации до сети ТРОУ по i -й ветви управления ИСУ.

Если все фазы обслуживания одинаковые, то формула (14) принимает вид

$$F_i(t) = 1 - e^{-ct} \sum_{k=0}^{M_{bi}-1} \frac{c^k}{k!} t^k, \quad t \geq 0, \quad (19)$$

где c – характеристика фаз обслуживания, $c = (\mu - \lambda)$; λ – интенсивность сообщений, поступающих в фазы обслуживания; μ – интенсивность обслуживания сообщений в фазах обслуживания.

Дифференцируя выражение (19) по времени, получим зависимость для определения плотности распределения времени доставки управляющей информации до сети ТРОУ по i -й ветви управления для случая, если все фазы обслуживания одинаковые:

$$f_i(t) = e^{-ct} \sum_{k=0}^{M_{bi}-1} \left\{ \frac{c^{k+1}}{k!} t^k - \frac{kc^k}{k!} t^{k-1} \right\}, \quad t \geq 0. \quad (20)$$

Принимая во внимание выражение (18), для определения МОЖ m_{t_i} и СКО σ_{t_i} времени доставки сообщений до элементов сети ТРОУ по i -й ветви управления можно записать:

$$m_{t_i} = \int_0^{\infty} t f_i(t) dt = \sum_{j=1}^{M_{bi}} b_j \int_0^{\infty} t e^{-c_j t} dt; \quad (21)$$

$$\sigma_{t_i} = \sqrt{\int_0^{\infty} t^2 f_i(t) dt - m_{t_i}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M_{bi}} b_j \int_0^{\infty} t^2 e^{-c_j t} dt - m_{t_i}^2}. \quad (22)$$

Выполнив интегрирование в выражениях (21) и (22), получим

$$m_{t_i} = \sum_{j=1}^{M_{bi}} \frac{a_j}{c_j}; \quad \sigma_{t_i} = \sqrt{2 \sum_{j=1}^{M_{bi}} \frac{a_j}{c_j^2} - m_{t_i}^2}. \quad (23)$$

Принимая во внимание выражения (1), (2), (17) и (18), зависимости для определения дифференциального и интегрального законов доставки сообщений до сети ТРОУ можно представить в виде

$$f_y(t) = \prod_{i=1}^{M_b} \sum_{j=1}^{M_{bi}} b_j e^{-c_j t}; \quad (24)$$

$$F_y(t) = \prod_{i=1}^{M_B} \left(1 - \sum_{j=1}^{M_{Bi}} a_j e^{-c_j t} \right). \quad (25)$$

Выражения (24) и (25) представляют собой полные дифференциальный и интегральный законы функционирования ИСУ.

Используя формулы, аналогичные (4) и (5), и учитывая выражение (24), для определения МОЖ m_t и СКО σ_t времени доставки сообщений до сети ТРОУ получим

$$m_t = \max_i \left(\sum_{j=1}^{M_{Bi}} \frac{a_j}{c_j} \right); \quad \sigma_t = \max_i \left(\sqrt{2 \sum_{j=1}^{M_{Bi}} \frac{a_j}{c_j^2} - m_t^2} \right). \quad (26)$$

Используя полученные дифференциальный и интегральный законы распределения времени, затрачиваемого ИСУ на доставку сообщений до сети ТРОУ, и формулы (7)–(11), можно определить:

1. Вероятности того, что время доставки сообщений до сети ТРОУ не превысит заданного времени t_3 :

$$P\{t < t_3\} = \prod_{i=1}^{M_B} \left(1 - \sum_{j=1}^{M_{Bi}} a_j e^{-c_j t_3} \right). \quad (27)$$

2. Вероятность того, что время доставки сообщений до сети ТРОУ будет удовлетворять условию $t_a \leq t \leq t_b$:

$$P\{t_a \leq t \leq t_b\} = \prod_{i=1}^{M_B} \left(\sum_{j=1}^{M_{Bi}} a_j \left(e^{-c_j t_a} - e^{-c_j t_b} \right) \right). \quad (28)$$

3. Время t_d доставки сообщений до сети ТРОУ, соответствующее заданной вероятности P_d :

$$\prod_{i=1}^{M_B} \left(1 - \sum_{j=1}^{M_{Bi}} a_j e^{-c_j t_d} \right) = P_d. \quad (29)$$

4. Максимально возможное значение времени $t_{\max}$ доставки сообщений до сети ТРОУ:

$$\prod_{i=1}^{M_B} \left(1 - \sum_{j=1}^{M_{Bi}} a_j e^{-c_j t_{\max}} \right) = 0,99. \quad (30)$$

Для нахождения времен доставки сообщений t_d и $t_{\max}$ с использованием уравнений (29) и (30) могут быть использованы методы решений трансцендентных уравнений [6, 7].

3. Закон функционирования иерархической системы управления на основе нормального закона обработки информации в последовательных фазах

Рассматривая i -ю ветвь управления, время доставки сообщений до сети ТРОУ можно представить в виде

$$t_i = \sum_{j=1}^{M_{Bi}} t_{ij}, \quad (31)$$

где t_{ij} – время, затрачиваемое на обработку информации в j -м элементе i -й ветви управления; M_{Bi} – число фаз обработки сообщений в i -й ветви управления.

Будем считать, что t_{ij} – независимые для всех фаз обработки сообщений случайные величины, распределенные по нормальному закону и имеющие конечные МОЖ $m_{\tau_{ij}}$ и СКО $\sigma_{\tau_{ij}}$ для $j = 1, 2, \dots, M_{Bi}$.

Независимость случайных величин t_{ij} следует из того, что величины, не связанные между собой по смыслу, являются независимыми и в вероятностном смысле, а правомерность допущения о нормальности случайных величин t_{ij} обусловлена тем, что они определяются достаточно большим количеством факторов, что является веским аргументом в пользу сделанного допущения.

Тогда совместная плотность распределения вероятностей M_{Bi} случайных величин t_{ij} будет иметь вид

$$f_i(t) = \prod_{j=1}^{M_{Bi}} f_{ij}(t), \quad (32)$$

где $f_i(t)$ – плотность распределения времени, затрачиваемого на доставку сообщений по i -й ветви управления до сети ТРОУ; $f_{ij}(t)$ – плотность распределения времени, затрачиваемого на обработку информации в j -м элементе i -й ветви управления,

$$f_{ij}(t) = \frac{1}{\sigma_{\tau_{ij}} \sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(t-m_{\tau_{ij}})^2}{2\sigma_{\tau_{ij}}^2} \right)}. \quad (33)$$

Недостаток модели (33) очевиден и связан с тем, что данная функция не является односторонней, т.е. она отлична от нуля при $t < 0$, в то время как по смыслу задачи $t \geq 0$. Этот недостаток несущественен, если $m_{\tau_{ij}} \gg \sigma_{\tau_{ij}}$, так как в этом случае значения функций плотности вероятности $f_{ij}(t)$ при $t < 0$ малы и ими при отрицательных значениях t можно пренебречь. Однако если условие $m_{\tau_{ij}} \gg \sigma_{\tau_{ij}}$ не выполняется, то использование нормального

распределения может привести к заметным погрешностям. Поэтому модель (33) целесообразно модифицировать, сдвинув кривую распределения несколько вправо, а оставшуюся левую часть кривой распределения при $t < 0$ отсечь.

Однако в этом случае, так как $t \geq 0$, при $t < 0$ должно выполняться условие $f_{ij}(t) \equiv 0$, которое приводят к условию нормирования вида

$$c_{\tau_{ij}} \int_0^{\infty} f_{ij}(t) dt = 1, \quad (34)$$

где $c_{\tau_{ij}}$ – нормирующий множитель.

Решая уравнения (34), находим следующее выражение для определения нормирующего множителя $c_{\tau_{ij}}$:

$$c_{\tau_{ij}} = \left[F \left(\frac{m_{\tau_{ij}}}{\sigma_{\tau_{ij}}} \right) \right]^{-1}, \quad (35)$$

где $F(x)$ – интеграл Лапласа,

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du; \quad F(-x) = 1 - F(x). \quad (36)$$

Таким образом, приходим к модели усеченного нормального распределения:

$$f_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{c_{\tau_{ij}}}{\sigma_{\tau_{ij}} \sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(t-m_{\tau_{ij}})^2}{2\sigma_{\tau_{ij}}^2} \right)} & \text{при } t \geq 0; \\ 0 & \text{при } t < 0. \end{cases} \quad (37)$$

В силу того что композиция независимых нормально распределенных случайных величин подчиняется нормальному закону распределения вероятностей, плотность распределения случайного времени t доставки сообщений до сети ТРОУ можно записать на основании выражений (31) и (32) в виде

$$f_i(t) = \frac{c_{t_i}}{\sigma_{t_i} \sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(t-m_{t_i})^2}{2\sigma_{t_i}^2} \right)}, \quad (38)$$

где m_{t_i} – МОЖ доставки сообщений по i -й ветви управления до сети ТРОУ,

$$m_{t_i} = \sum_{j=1}^{M_{\theta i}} m_{\tau_{ij}}; \quad (39)$$

σ_{t_i} – СКО доставки сообщений по i -й ветви управления до сети ТРОУ,

$$\sigma_{t_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{M_{Bi}} \sigma_{\tau_{ij}}^2}; \quad (40)$$

c_{t_i} – нормирующий множитель,

$$c_{t_i} = \prod_{j=1}^{M_{Bi}} c_{\tau_{ij}}. \quad (41)$$

Принимая во внимание выражения (2) и (38), плотность распределения времени доставки сообщений до сети ТРОУ можно представить в виде

$$f_y(t) = \prod_{i=1}^{M_B} (c_{t_i}) \prod_{i=1}^{M_B} \left(\frac{1}{\sigma_{t_i} \sqrt{2\pi}} \right) e^{\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^{M_B} \frac{(t-m_{t_i})^2}{\sigma_{t_i}^2} \right)}. \quad (42)$$

Используя формулы (4)–(5), (39) и (40), зависимости для определения полного МОЖ и СКО времени доставки сообщений до сети ТРОУ можно представить в виде

$$m_t = \max_i \left(\sum_{j=1}^{M_{Bi}} m_{\tau_{ij}} \right); \quad \sigma_t = \max_i \left(\sum_{j=1}^{M_{Bi}} \sigma_{\tau_{ij}}^2 \right). \quad (43)$$

Используя плотность распределения времени, затрачиваемого ИСУ на доставку сообщений до сети ТРОУ и формулы (8)–(11), можно определить:

1) вероятность того, что время доставки сообщений до сети ТРОУ не превысит заданной величины t_3 :

$$P\{t < t_3\} \equiv F_y(t_3) = \prod_{i=1}^{M_B} (c_{t_i}) \prod_{i=1}^{M_B} \left(\frac{1}{\sigma_{t_i} \sqrt{2\pi}} \right) \int_0^{t_3} e^{\left(-\sum_{i=1}^{M_B} \frac{(t-m_{t_i})^2}{2\sigma_{t_i}^2} \right)} dt; \quad (44)$$

2) вероятность того, что время доставки сообщений до сети ТРОУ будет удовлетворять условию $t_a \leq t \leq t_b$:

$$P\{t_a \leq t \leq t_b\} = \prod_{i=1}^{M_B} (c_{t_i}) \prod_{i=1}^{M_B} \left(\frac{1}{\sigma_{t_i} \sqrt{2\pi}} \right) \int_{t_a}^{t_b} e^{\left(-\sum_{i=1}^{M_B} \frac{(t-m_{t_i})^2}{2\sigma_{t_i}^2} \right)} dt; \quad (45)$$

3) время t_d доставки сообщений до сети ТРОУ, соответствующее заданной вероятности P_d :

$$\prod_{i=1}^{M_B} (c_{t_i}) \prod_{i=1}^{M_B} \left(\frac{1}{\sigma_{t_i} \sqrt{2\pi}} \right) \int_0^{t_d} e^{\left(-\sum_{i=1}^{M_B} \frac{(t-m_{t_i})^2}{2\sigma_{t_i}^2} \right)} dt = P_d. \quad (46)$$

4) максимально возможное значение времени $t_{\max}$ доставки сообщений до сети ТРОУ:

$$\prod_{i=1}^{M_B} (c_{t_i}) \prod_{i=1}^{M_B} \left(\frac{1}{\sigma_{t_i} \sqrt{2\pi}} \right) \int_0^{t_{\max}} e^{\left(-\sum_{i=1}^{M_B} \frac{(t-m_{t_i})^2}{2\sigma_{t_i}^2} \right)} dt = 0,99. \quad (47)$$

Решение уравнений (46) и (47) относительно t_d и $t_{\max}$ может быть выполнено с использованием численных методов решения нелинейных уравнений [6, 7].

Заключение

С использованием понятия ветви управления разработана вероятностно-временная модель функционирования ИСУ, а именно получены общие выражения для интегрального и дифференциального законов распределения времени доставки сообщений из ЕИП до сети ТРОУ.

На основании общих выражений для интегрального и дифференциального законов распределения времени доставки сообщений из ЕИП до сети ТРОУ получены законы функционирования ИСУ на основе экспоненциального и нормального законов обработки информации в последовательных фазах. Знание параметров этих законов позволяет обоснованно подходить к заданию параметров ИСУ при ее синтезе, исходя из требуемого времени доставки сообщений до сети ТРОУ с заданной вероятностью.

Список литературы

1. Месарович М., Мако Д., Такахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. М. : Изд-во Мир, 1973. 344 с.
2. Мхитарян В. С., Шишов В. Ф., Козлов А. Ю. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. М. : Академия, 2012. 416 с.
3. Сидоров А. И., Козлов А. Ю., Майоров П. Е. Определение закона функционирования подсистемы управления организационно-технической системы специального назначения // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне : в 2 т. / под ред. М. А. Щербакова. Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2015. Т. 1. С. 89–93.
4. Информационные технологии в системе управления силами ВМФ / Воен.-Морской флот Рос. Федерации ; под общ. ред. В. В. Авдошина. СПб. : Элмор, 2005. 822 с.
5. Туровский О. М. Об одном случае определения вероятностно-временных характеристик прохождения информации в АСУ // Вопросы судостроения. 1975. № 2. С. 35–44.
6. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Определения, теоремы, формулы. М. : Книга по Требованию, 2014. 832 с.
7. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики : учеб. пособие. 4-е изд., стер. СПб. : Лань, 2009. 608 с.

References

1. Mesarovich M., Mako D., Takakhara I. *Teoriya ierarkhicheskikh mnogourovnnykh system = The theory of hierarchical multilevel systems*. Moscow: Izd-vo Mir, 1973:344. (In Russ.)

2. Mkhitaryan V.S., Shishov V.F., Kozlov A.Yu. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika: uchebnik dlya stud. uchrezhdeniy vyssh. prof. obrazovaniya* = *Theory of Probability and Mathematical Statistics: textbook for student of higher education*. Moscow: Akademiya, 2012:416. (In Russ.)
3. Sidorov A.I., Kozlov A.Yu., Mayorov P.E. Determination of the law of functioning of the control subsystem of the organizational and technical system of special purpose. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: sb. st. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 70-letiyu Pobedy v Velikoy Oteche-stvennoy voyne: v 2 t.* = *Automation and control problems in technical systems: proceedings of the International scientific and engineering conference, dedicated to the 70th anniversary of the Victory in the Great Patriotic War: in 2 volumes*. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2015;1:89–93. (In Russ.)
4. *Informatsionnye tekhnologii v sisteme upravleniya silami VMF* = *Information technology in the control system of the Navy Forces. Voen.-Morskoy flot Ros. Federatsii*. Saint-Petersburg: Elmor, 2005:822. (In Russ.)
5. Turovskiy O.M. On one case of determining the probabilistic-temporal characteristics of the passage of information in the ACS. *Voprosy sudostroeniya* = *Shipbuilding issues*. 1975;2:35–44. (In Russ.)
6. Korn G. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov: Opredeleniya, teoremy, formuly* = *A handbook of mathematics for scientists and engineers: Definitions, Theorems, Formulas*. Moscow: Kniga po Trebovaniyu, 2014:832. (In Russ.)
7. Marchuk G.I. *Metody vychislitel'noy matematiki: ucheb. posobie. 4-e izd., ster.* = *Methods of computational mathematics: textbook, the 4th edition*. Saint-Petersburg: Lan', 2009:608. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Юрьевич Козлов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры автоматики
и телемеханики, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: _kozlov_@mail.ru

Andrey Yu. Kozlov

Doctor of engineering sciences, associate
professor, professor of the sub-department
of automation and telemechanics,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Алексей Иванович Сидоров

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой автономных
информационных и управляющих
систем, Пензенский государственный
университет (Россия,
г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: sidorov_62@mail.ru

Aleksey I. Sidorov

Doctor of engineering sciences, professor,
head of the sub-department of autonomous
information and control systems,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 25.02.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 10.03.2021

Принята к публикации / Accepted 25.03.2021

УДК 621.923.4

doi:10.21685/2072-3059-2021-2-10

Центробежно-ротационная обработка сменных многогранных пластин режущего инструмента

А. В. Липов¹, Н. Н. Нырков², В. А. Липов³^{1,2,3}Пензенский государственный университет, Пенза, Россия¹morsha58@yandex.ru, ²nikolai.nyrkov@gmail.com, ³s310.hwm@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования являются сменные многогранные пластины инструмента из твердого сплава с округленными режущими кромками для повышения их прочности. Предмет исследования – операция центробежно-ротационной обработки для округления режущих кромок пластин и повышения качества их рабочих поверхностей. Цель работы – повышение производительности процесса и определение рациональных режимов без сколов и выкрашиваний на режущих кромках пластин. *Материалы и методы.* Исследование процесса обработки проводилось с применением математического планирования экспериментов и статистической обработкой результатов с использованием двухуровневых дробных планов с логарифмическим преобразованием выходных параметров. *Результаты.* Получены эмпирические зависимости влияния на радиус округления режущих кромок пластин и шероховатость их рабочих поверхностей диаметра рабочей камеры центробежно-ротационного станка, частоты вращения ротора, угла заострения режущего клина пластин, длительности обработки, режущей способности абразивного наполнителя и применяемой технологической жидкости. *Выводы.* Проведенные исследования позволили повысить производительность процесса округления режущих кромок и качества рабочих поверхностей сменных многогранных пластин путем применения центробежно-ротационной обработки. Определены рациональные режимы обработки, которые исключают появление брака в виде сколов и выкрашиваний режущих кромок пластин.

Ключевые слова: сменные многогранные пластины, округление режущих кромок, центробежно-ротационная обработка, центробежно-ротационный станок, радиус округления, шероховатость рабочих поверхностей, рациональные режимы обработки

Для цитирования: Липов А. В., Нырков Н. Н., Липов В. А. Центробежно-ротационная обработка сменных многогранных пластин режущего инструмента // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2. С. 113–122. doi:10.21685/2072-3059-2021-2-10

A rotary centrifugal machining of replaceable multi-faceted cutting tool inserts

A.V. Lipov¹, N.N. Nyrkov², V.A. Lipov³^{1,2,3}Penza State University, Penza, Russia¹morsha58@yandex.ru, ²nikolai.nyrkov@gmail.com, ³s310.hwm@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the research is replaceable multi-faceted carbide tool inserts with rounded cutting edges to increase their strength. The subject of the research is the operation of centrifugal-rotary processing for rounding the cutting edges of the plates and

improving the quality of their working surfaces. The purpose of the research is to increase the productivity of the process and determine the rational modes without chips and chipping on the cutting edges of the plates. *Materials and methods.* The study of the processing was carried out using mathematical planning of experiments and statistical processing of the results using two-level fractional designs with a logarithmic transformation of the output parameters. *Results.* Empirical dependences of the influence on the radius of rounding of the cutting edges of the plates and the roughness of their working surfaces of the working chamber diameter of a centrifugal rotary machine, the rotor speed, the angle of sharpening of the cutting wedge of the plates, the duration of processing, the cutting ability of the abrasive filler and the applied process fluid are obtained. *Conclusions.* The research carried out made it possible to increase the productivity of the rounding process of cutting edges and the quality of the working surfaces of replaceable multi-faceted plates by using centrifugal-rotary machining. Rational processing modes have been determined, which exclude the appearance of defects in the form of chips and chipping of the cutting edges of the plates.

Keywords: replaceable multifaceted inserts, rounding of cutting edges, centrifugal rotary machining, centrifugal rotary machine, rounding radius, roughness of working surfaces, rational processing modes

For citation: Lipov A.V., Nyrkov N.N., Lipov V.A. A rotary centrifugal machining of replaceable multi-faceted cutting tool inserts. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = University proceedings. Volga region. Engineering sciences.* 2021;2:113–122. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-2-10

Введение

Сменные многогранные пластины (СМП) из твердых сплавов получили широкое применение при изготовлении режущих инструментов. Объем инструментов с СМП составляет примерно 55 % всего используемого инструмента и обеспечивает формирование 50–60 % всего объема стружки, возникающей при механической обработке [1].

Одним из недостатков твердосплавного инструмента является повышенная хрупкость, которая приводит к появлению сколов и выкрашиваний на режущих кромках, особенно в условиях прерывистого и чернового резания. Так, для инструмента с СМП количество отказов, связанных с разрушением кромок пластин, составляет 70–75 % от общего числа отказов [2]. При этом наиболее характерными причинами отказов инструментов являются сколы, выкрашивания кромок и поломки пластин, которые в основном происходят при превышении напряжений в режущем клине допустимых значений, что связано с недостаточной прочностью пластин.

1. Способы повышения прочности твердосплавного режущего инструмента

Существуют различные способы повышения прочности режущего клина твердосплавных пластин инструмента: создание отрицательной фаски на режущей кромке, применение специальных покрытий и термообработки, округление режущих кромок и т.д. [3, 4]. При этом установлено, что создание сжимающих напряжений в поверхностном слое или их определенного соотношения с растягивающими положительно сказывается на повышении прочности. Это связано с тем, что допустимые значения напряжений сжатия для пластин из твердого сплава значительно превышают допустимые значения напряжений растяжения.

Одним из наиболее распространенных способов повышения прочности твердосплавного инструмента является округление режущих кромок пластин. При этом направление результирующей силы резания смещается в сторону биссектрисы угла заострения режущего клина, что способствует более симметричному его нагружению, а следовательно, увеличению прочности. Однако необходимо учитывать, что при этом могут значительно повыситься силы резания и температура элементов инструмента, что отрицательно сказывается на процессе резания.

В ГОСТ 19086-80 «Пластины сменные многогранные твердосплавные» указано, что все СМП со стружколомающими канавками и необработанными ленточками, кроме пластин из твердого сплава марки Т30К4, должны подвергаться виброабразивной обработке для округления режущих кромок. Рекомендуемая величина радиуса округления r зависит от материала и диаметра вписанной окружности СМП.

Анализ результатов виброабразивной обработки СМП показал, что происходит не только округление режущих кромок пластин, но и снижается шероховатость их рабочих (опорных и режущих) поверхностей по параметру R_a . Однако значительная длительность процесса обработки (до 4 ч), необходимая для обеспечения требуемых качественных характеристик СМП, часто становится неприемлемой, особенно в производственных условиях.

2. Центробежно-ротационная обработка сменных многогранных пластин

В работах [5, 6] предложено для отделочно-зачистной обработки СМП применять объемную центробежно-ротационную обработку (ЦРО), которая обеспечивает производительность, многократно (в 5–10 раз) превышающую производительность виброабразивной обработки деталей из различных материалов [7]. Объемная ЦРО, при которой пластины и абразивный наполнитель свободно загружаются в рабочую камеру, отличается более высокой производительностью по сравнению с другими разновидностями – шпиндельной и в емкостях [8–10].

При объемной ЦРО абразивный наполнитель, вместе с обрабатываемыми СМП, приводится во вращательное движение ротором вокруг вертикальной оси рабочей камеры станка таким образом, что формируется поток рабочей загрузки, который приобретает форму тора, при этом наполнитель и пластины движутся по спиральным траекториям. Создание тороидально-винтового потока обеспечивается конструкцией рабочей камеры центробежно-ротационного станка (ЦРС), образованной неподвижной обечайкой 1 и вращающимся ротором 4, выполненным обычно в форме тарели (рис. 1). При этом абразивный наполнитель 2 и СМП 3 находятся в технологической жидкости, непрерывно подаваемой в рабочую камеру ЦРС.

Абразивный наполнитель применяют в виде гранул различной формы (шар, конус, параллелепипед, пирамида, цилиндр и др.). По составу наполнитель может быть на керамической или полимерной связке. Жидкость, подаваемая в рабочую камеру станка, служит для очистки и сохранения режущих свойств абразивного наполнителя, ускорения процесса обработки, защиты поверхности обрабатываемых деталей и др.

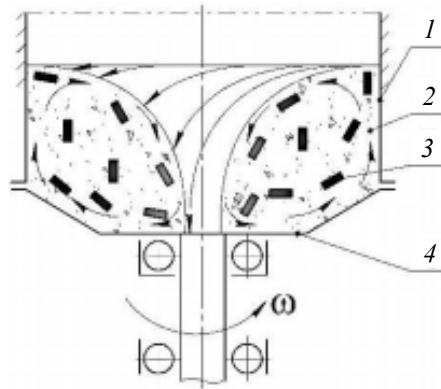


Рис. 1. Схема центробежно-ротационной объемной обработки:
1 – обечайка; 2 – абразивный наполнитель; 3 – обрабатываемые детали; 4 – ротор

3. Экспериментальные исследования и обработка их результатов

С учетом сложности процесса объемной ЦРО СМП с абразивным наполнителем в рабочей камере ЦРС для исследования режимов и условий обработки на радиус округления ρ и шероховатость рабочих поверхностей пластин по параметру R_a применялся метод математического планирования экспериментов со статистической обработкой полученных результатов [11, 12]. Значительное количество переменных факторов, а также учет их взаимодействий и нелинейности требует проведения большого числа экспериментов. Поэтому для снижения трудоемкости экспериментальных исследований применялись двухуровневые дробные планы с логарифмическим преобразованием выходных параметров, которые позволяют провести фиксацию части факторов на некоторых близких к оптимальным значениях. Для оценки величин этих постоянных были проведены поисковые исследования, в ходе которых определялись и диапазоны варьирования каждого переменного фактора.

Исследования проводились на двух ЦРС с разными диаметрами рабочих камер при изменении частоты вращения роторов. В качестве привода роторов использовались асинхронные электродвигатели. Регулирование частоты вращения обеспечивалось частотным преобразователем модели VFD 037E43A и преобразователем интерфейсов модели AC-4, который позволяет производить управление электродвигателями с компьютера.

При проведении исследований величины ρ измерялись на инструментальном микроскопе модели ММИ-2 с блоком цифровой индикации модели УЦП-1М, а параметр R_a – на профилометре модели 283 с унифицированной электронной системой. Кроме того, для оценки влияния ЦРО на физико-механические характеристики поверхностного слоя СМП проводились рентгенографические исследования с использованием дифрактометра модели ДРОН-3.

Измерения величин ρ и R_a проводились после каждых 5 мин обработки при общей длительности процесса 60 мин для различных условий и режимов обработки.

Постоянные и переменные факторы с диапазоном их варьирования, полученные при проведении поисковых экспериментальных исследований:

– исследования проводились на ЦРС с диаметрами рабочих камер D 225 и 425 мм;

– диапазон изменения частоты вращения n ротора ЦРС следует устанавливать в интервале от 130 до 220 мин⁻¹, так как при меньшем ее значении не формируется тороидально-винтовой поток, а при большем – отмечались отдельные выкрашивания и сколы на режущих кромках СМП при их соударениях;

– величина коэффициента соотношения объемов обрабатываемых СМП и наполнителя, загружаемых в рабочую камеру, была принята 0,04;

– при проведении экспериментальных исследований использовались гранулы на керамической связке размерами от 5 до 10 мм из электрокорунда белого с зерном 40 мкм;

– в качестве технологической жидкости применялся 3 % раствор соды кальцированной;

– обработке подвергались пластины из однокарбидного твердого сплава марки ВК-8 и двухкарбидного сплава марок Т15К6 и Т14К8;

– угол заострения режущего клина β пластин задавался от 75 до 115°, а масса пластин составляла от 8 до 16 г;

– степень заполнения рабочей камеры ЦРС составляла 0,2;

– время обработки t задавалось от 5 до 60 мин;

– температура технологической жидкости была принята равной 70 °С.

4. Анализ результатов исследований

В результате обработки результатов экспериментальных исследований по известной методике были получены зависимости для определения величин ρ и R_a в следующем виде:

$$\rho = 4,05 \cdot 10^{-4} D^{0,619} n^{0,299} t^{0,357} \beta^{1,324} K_{ра} K_{отс} K_{рж};$$

$$R_a = \frac{277}{D^{0,575} n^{0,469} t^{0,24} K_{ра} K_{отс} K_{рж}}.$$

Влияние качественных параметров ЦРО (вид абразивного наполнителя, марка твердого сплава и состав технологической жидкости) на величины ρ и R_a приближенно оценивают коэффициентами, входящими в эти зависимости: $K_{ра}$ – учитывает режущую способность абразива, $K_{отс}$ – обрабатываемость твердого сплава и $K_{рж}$ – влияние применяемой рабочей жидкости на интенсивность обработки. Величины этих коэффициентов могут быть определены эмпирическим путем, например по методике, изложенной в работе [7]. В выполненных нами исследованиях величины коэффициентов были приняты равными 1. Полученные зависимости позволяют оценить влияние каждого из переменных факторов на формирование значений ρ и R_a .

Проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии проводилась по t -критерию Стьюдента, а проверка адекватности модели – с использованием F -критерия Фишера. Было установлено, что масса пластин является статистически незначимым переменным фактором при получении зависимостей для определения ρ и R_a . Это объясняется сравнительно небольшим диапазоном изменения частоты вращения ротора ЦРС, ограниченным условием проведения обработки пластин без появления выкрашиваний и сколов на ре-

жущих кромках. Угол заострения режущего клина β является статистически незначимым переменным фактором только при получении зависимости для определения параметра R_a .

На рис. 2 показан характер изменения величин ρ и R_a от времени ЦРО t . Графические зависимости, приведенные на рис. 2, свидетельствуют о том, что интенсивность съема материала с рабочих поверхностей СМП более высокая в начальный период обработки, а с течением времени замедляется. Это объясняется тем, что в начальный период радиус округления формируется в основном за счет сколов зерен карбидов твердых сплавов и частичного межзеренного разрушения, которое в дальнейшем становится преобладающим. Величина параметра R_a , как и при всех видах объемной обработки, с течением времени уменьшается и приближается к предельно допустимому значению для данных режимов и условий обработки.

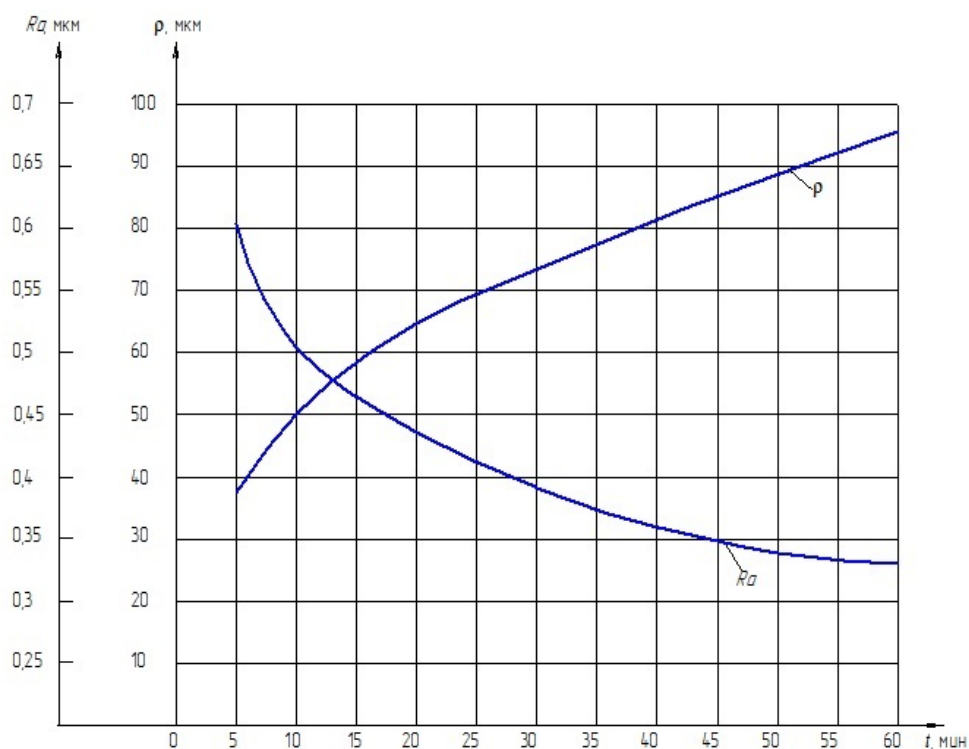


Рис. 2. Влияние времени обработки t на радиус округления режущих кромок ρ и шероховатость рабочих поверхностей R_a твердосплавных пластин ($D = 425$ мм, $\beta = 75^\circ$, $n = 125$ мин $^{-1}$)

На рис. 3 приведены графические зависимости изменения величин ρ и R_a при варьировании частоты вращения ротора n (для $D = 425$ мм, $\beta = 75^\circ$ и $t = 20$ мин). С увеличением величины n повышается интенсивность съема материала с поверхности СМП, что связано с ростом контактных давлений в потоке обрабатывающей среды. Однако при этом повышается расход абразивного наполнителя и возникает опасность появления сколов и выкрашиваний на режущих кромках СМП при их взаимных соударениях в рабочей камере ЦРС.

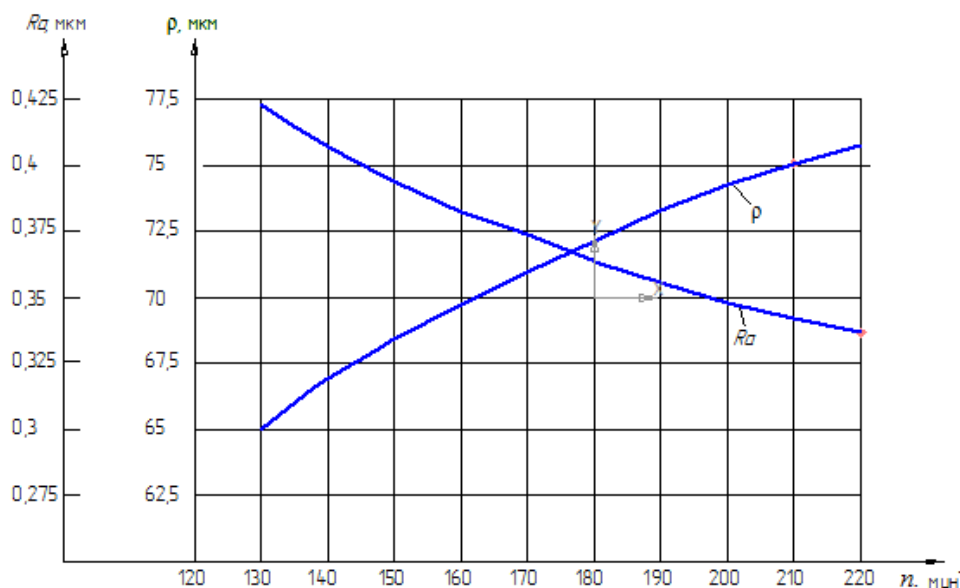


Рис. 3. Влияние частоты вращения ротора станка n на радиус округления режущих кромок ρ и шероховатость рабочих поверхностей СМП Ra

Увеличение диаметра рабочей камеры ЦРС также приводит к повышению контактных давлений в тороидально-винтовом потоке абразивного наполнителя и обрабатываемых пластин, что увеличивает интенсивность съема твердого сплава. Однако это приводит не только к увеличению потребного количества абразивного наполнителя, но и сопровождается его интенсивным износом.

При одних и тех же условиях и режимах обработки с увеличением величины заострения режущего клина β увеличивается радиус округления режущих кромок ρ . Это обусловлено тем, что при одной и той же величине съема твердого сплава у СМП с большей величиной β образуется больший радиус ρ .

Для оценки влияния ЦРО на физико-механические характеристики поверхностного слоя СМП были проведены исследования на пластинах из сплава ВК-8 с использованием вышеописанного дифрактометра модели ДРОН-3. ЦРО проводилась при следующих режимах и условиях: $D = 425$ мм, $n = 220$ мин⁻¹, $t = 35$ мин, абразивный наполнитель – электрокорунд белый с зерном 40 мкм, технологическая жидкость – 3 % раствор кальцированной соды. По измеренным значениям межплоскостных расстояний и сумм главных напряжений в поверхностных слоях необработанных и после ЦРО СМП установлено, что данный вид обработки не приводит к их значительным изменениям, что свидетельствует о стабильности физико-механических характеристик до и после обработки.

Заключение

Показано, что объемная ЦРО СМП с абразивным наполнителем в рабочей камере ЦРС характеризуется высокой производительностью процесса,

однако при такой схеме ее проведения может возникать значительное количество пластин с браком в виде сколов и выкрашиваний на их режущих кромках.

Приведены результаты экспериментальных исследований объемной ЦРО СМП инструмента для округления режущих кромок и повышения качества обработки режущих и опорных поверхностей пластин.

Получены эмпирические зависимости для определения рациональных режимов обработки СМП, которые исключают возможность появления брака в виде сколов и выкрашиваний на режущих кромках твердосплавных пластин.

Список литературы

1. Кожевников Д. В., Кирсанов С. В. Резание материалов : учебник для вузов. 2-е изд. М. : Машиностроение, 2012. 304 с.
2. Артамонов Е. В. Повышение работоспособности сборных режущих инструментов на основе исследования напряженно-деформированного состояния и прочности сменных твердосплавных пластин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Томск, 2003. 34 с.
3. Хае Г. Л., Гах В. Л., Громаков К. Г. [и др.]. Сборный твердосплавный инструмент / под общ. ред. Г. Л. Хае. М. : Машиностроение, 1989. 256 с.
4. Ящерицын П. И., Фельдштейн Е. Э., Корниевич М. А. Теория резания : учебник. 2-е изд. Минск : Новое знание, 2006. 512 с.
5. Липов А. В., Нырков Н. Н. Центробежно-ротационная обработка сменных многогранных пластин режущего инструмента // Проблемы исследования и проектирования машин. Новые химические технологии, защитные и специальные покрытия: производство и применение : сб. ст. по материалам XII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2019. С. 6–11.
6. Нырков Н. Н. Совершенствование технологии объемной финишной обработки неперетачиваемого твердосплавного инструмента : дис. ... канд. техн. наук. Пенза, 1999. 176 с.
7. Трилисский В. О. Повышение эффективности отделочно-зачистных операций путем создания теории, оборудования и технологии объемной центробежно-ротационной обработки деталей : дис. ... д-ра техн. наук. 1992. 259 с.
8. Липов А. В., Павловский П. Г., Леонов А. А. Отделочно-зачистная обработка твердосплавного режущего инструмента // Техника и технология современного производства : сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. Пенза : Приволжский Дом знаний, 2019. С. 108–112.
9. Липов А. В., Павловский П. Г., Липов В. А. Особенности центробежно-ротационной обработки сменных многогранных пластин режущего инструмента // Инновации технических решений в машиностроении и транспорте : сб. ст. VI Всерос. науч.-техн. конф. для молодых ученых и студентов с междунар. участием (Пенза, 19–20 марта 2020). Пенза : РИО ПГАУ, 2020. С. 100–102.
10. Липов А. В., Павловский П. Г., Липов В. А. Исследование центробежно-ротационной обработки концевых твердосплавных режущих инструментов // Вестник Пензенского государственного университета. 2020. № 4. С. 89–94.
11. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. М. : Машиностроение, 1974. 231 с.
12. Грачев Ю. П., Плаксин Ю. М. Математические методы планирования экспериментов : учеб. пособие. М. : ДеЛиПринт, 2005. 296 с.

References

1. Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. *Rezanie materialov: uchebnik dlya vuzov. 2-e izd = Cutting materials: textbook, the 2nd edition*. Moscow: Mashinostroenie, 2012:304.

2. Artamonov E.V. *Povyshenie rabotosposobnosti sbornykh rezhushchikh instrumentov na osnove issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i prochnosti smennykh tverdosplavnykh plastin: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk = Improving the performance of prefabricated cutting tools based on the study of the stress-strain state and strength of replaceable carbide inserts: author's abstract of dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences.* Tomsk, 2003:34.
3. Khaet G.L., Gakh V.L., Gromakov K.G. [et al.]. *Sbornyy tverdosplavnoy instrument = Assembled carbide tool.* Moscow: Mashinostroenie, 1989:256.
4. Yashcheritsyn P.I., Fel'dshteyn E.E., Kornievich M.A. *Teoriya rezaniya: uchebnik. 2-e izd. = Cutting theory: textbook, the 2nd edition.* Minsk: Novoe znanie, 2006:512.
5. Lipov A.V., Nyrkov N.N. Rotary centrifugal machining of replaceable multi-faceted cutting tool inserts. *Problemy issledovaniya i proektirovaniya mashin. Novye khimicheskieskie tekhnologii, zashchitnye i spetsial'nye pokrytiya: proizvodstvo i primeneniye: sb. st. po materialam XII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Research and design issues of machines. New chemical technologies, protective and special coatings: production and application: proceedings of the 12th International scientific and engineering conference.* Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2019:6–11.
6. Nyrkov N.N. *Sovershenstvovanie tekhnologii ob"emnoy finishnoy obrabotki nepretachivaemogo tverdosplavnogo instrumenta: dis. kand. tekhn. nauk = Improvement of the technology of "removable finishing of non-regrind carbide tools: dissertation to apply for the degree of the candidate of engineering sciences.* Penza, 1999:176.
7. Trilisskiy V.O. *Povyshenie effektivnosti otdelchno-zachistnykh operatsiy putem sozdaniya teorii, oborudovaniya i tekhnologii ob"emnoy tsentrobezhno-rotatsionnoy obrabotki detaley: dis. d-ra tekhn. nauk = Improving the efficiency of finishing and protective operations by creating a theory, equipment and technology for volumetric centrifugal-rotary processing of parts: dissertation to apply for the degree of the doctor of engineering sciences.* 1992:259.
8. Lipov A.V., Pavlovskiy P.G., Leonov A.A. Finishing and deburring of carbide cutting tools. *Tekhnika i tekhnologiya sovremennogo proizvodstva: sb. st. Vseros. nauch.-prakt. konf. = Technique and technology of modern production: proceedings of the All-Russian scientific and practical conference.* Penza: Privolzhskiy Dom znaniy, 2019:108–112.
9. Lipov A.V., Pavlovskiy P.G., Lipov V.A. Features of centrifugal-rotary machining of replaceable multifaceted cutting tool inserts. *Innovatsii tekhnicheskikh resheniy v mashinostroenii i transporte: sb. st. VI Vseross. nauch.-tekhn. konf. dlya molodykh uchenykh i studentov s mezhdunar. uchastiem (Penza, 19–20 marta 2020) = Innovation of technical solutions in mechanical engineering and transport: proceedings of the 5th All-Russian scientific and engineering conference for young scientists and students with international participation.* Penza: RIO PGAU, 2020:100–102.
10. Lipov A.V., Pavlovskiy P.G., Lipov V.A. Research of centrifugal-rotary machining of end carbide cutting tool. *Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Penza State University.* 2020;4:89–94.
11. Katsev P.G. *Statisticheskie metody issledovaniya rezhushchego instrumenta = Statistical research methods for cutting tools.* Moscow: Mashinostroenie, 1974:231.
12. Grachev Yu.P., Plaksin Yu.M. *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov: ucheb. posobie = Mathematical methods for planning experiments: textbook.* Moscow: DeLiPrint, 2005:296.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Викторович Липов

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры технологий
и оборудования машиностроения,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: morsha58@yandex.ru

Aleksandr V. Lipov

Candidate of engineering sciences,
associate professor, associate professor
of the sub-department of technologies
and equipment for mechanical engineering,
Penza State University (40 Krasnaya
street, Penza, Russia)

Николай Николаевич Нырк

кандидат технических наук, инженер
кафедры компьютерного проектирования
технологического оборудования,
Пензенский государственный
университет (Россия, г. Пенза,
ул. Красная, 40)

E-mail: nikolai.nyrkov@gmail.com

Nikolay N. Nyrkov

Candidate of engineering sciences, engineer
of the sub-department of computer design
of technological equipment, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Виталий Александрович Липов

магистрант, Пензенский
государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: s310.hwm@yandex.ru

Vitaliy A. Lipov

Master's degree student, Penza
State University (40 Krasnaya street,
Penza, Russia)

Поступила в редакцию / Received 17.02.2021

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 12.03.2021

Принята к публикации / Accepted 02.04.2021

Вниманию авторов!

Редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» приглашает специалистов опубликовать на его страницах оригинальные статьи, содержащие новые научные результаты в области информатики, вычислительной техники, управления, электроники, измерительной техники, радиотехники, машиностроения, машиноведения, а также обзорные статьи по тематике журнала.

Статьи, ранее опубликованные, а также принятые к опубликованию в других журналах, редколлегией не рассматриваются.

Редакция принимает к рассмотрению статьи, подготовленные с использованием текстового редактора Microsoft Word for Windows (тип файла – RTF, DOC).

Необходимо представить статью в электронном виде (VolgaVuz@mail.ru) и дополнительно на бумажном носителе в двух экземплярах. Оптимальный объем рукописи 10–14 страниц формата A4. Основной шрифт статьи – Times New Roman, 14 pt через полупетельный интервал. Статья **обязательно** должна содержать индекс УДК, ключевые слова и развернутую аннотацию объемом от 100 до 250 слов, имеющую четкую структуру **на русском** (Актуальность и цели. Материал и методы. Результаты. Выводы) **и английском языках** (Background. Materials and methods. Results. Conclusions).

Обращаем внимание авторов на то, что в соответствии с этическим кодексом журнала для обеспечения единообразия перевод фамилии, имени, отчества каждого автора на английский язык (в сведениях об авторах и списке литературы) осуществляется автоматически с использованием программы транслитерации в кодировке BGN (сайт translit.ru).

Рисунки и таблицы должны быть размещены в тексте статьи и представлены в виде отдельных файлов (растровые рисунки в формате TIFF, BMP с разрешением 300 dpi, векторные рисунки в формате Corel Draw с минимальной толщиной линии 0,75 pt). Рисунки должны сопровождаться подрисуночными подписями.

Формулы в тексте статьи **обязательно** должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Word Equation (версия 3.0) или MathType. Символы греческого и русского алфавита должны быть набраны прямо, нежирно; латинского – курсивом, нежирно; обозначения векторов и матриц прямо, жирно; цифры – прямо, нежирно. Наименования химических элементов набираются прямо, нежирно. Эти же требования **необходимо** соблюдать и в рисунках. Допускается вставка в текст специальных символов (с использованием шрифтов Symbol).

В списке литературы **нумерация источников** должна соответствовать **очередности ссылок** на них в тексте ([1], [2], ...). Номер источника указывается в квадратных скобках. **Требования к оформлению списка литературы** на русские и иностранные источники: **для книг** – фамилия и инициалы автора, название, город, издательство, год издания, том, количество страниц; **для журнальных статей, сборников трудов** – фамилия и инициалы автора, название статьи, полное название журнала или сборника, серия, год, том, номер, страницы; **для материалов конференций** – фамилия и инициалы автора, название статьи, название конференции, город, издательство, год, страницы.

К материалам статьи **должна** прилагаться следующая информация: фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, место и юридический адрес работы (на русском и английском языках), e-mail, контактные телефоны (желательно сотовые).

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается. Рукопись, полученная редакцией, не возвращается. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную и допечатную правку текстов статей, не изменяющую их основного смысла, без согласования с автором.

Статьи, оформленные без соблюдения приведенных выше требований, к рассмотрению не принимаются.

Уважаемые читатели!

Для гарантированного и своевременного получения журнала **«Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки»** рекомендуем вам оформить подписку.

Журнал выходит 4 раза в год. Научные специальности журнала:

05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
05.02.08 Технология машиностроения
05.02.11 Методы контроля и диагностика в машиностроении
05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений)
05.11.14 Технология приборостроения
05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям)
05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)
05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Стоимость одного номера журнала – 500 руб. 00 коп.

Для оформления подписки через редакцию необходимо заполнить и отправить заявку в редакцию журнала: факс/тел. (841-2) 64-32-89. E-mail: VolgaVuz@mail.ru

Подписку можно также оформить по объединенному каталогу «Пресса России» тематические разделы «Компьютеры. Информатика. Программные продукты», «Машиностроение», «Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов». Подписной индекс – 36949.

ЗАЯВКА

Прошу оформить подписку на журнал «Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки» на 20__ г.

№ 1 – _____ шт., № 2 – _____ шт., № 3 – _____ шт., № 4 – _____ шт.

Наименование организации (полное) _____

ИНН _____ КПП _____

Почтовый индекс _____

Республика, край, область _____

Город (населенный пункт) _____

Улица _____ Дом _____

Корпус _____ Офис _____

ФИО ответственного _____

Должность _____

Тел. _____ Факс _____ E-mail _____

Руководитель предприятия _____

(подпись)

(ФИО)

Дата « ____ » _____ 20__ г.